

9

59^e jaargang

NATUUR '91 & TECHNIEK

natuurwetenschappelijk en technisch maandblad



TELEFOON

PSYCHE EN IMMUNOLOGIE/SUPERSNAREN/
RELIËF IN PLATTE BEELDEN/HET BEGIN VAN HET GETAL

Geneesmiddelen-Innovatie vandaag voor de gezondheid van morgen:

Boehringer Ingelheim stelt zich voor:

Boehringer Ingelheim begon haar activiteiten in de chemische en farmaceutische sector in 1885.

Boehringer Ingelheim neemt thans, meer dan honderd jaar later, een belangrijke plaats in op de lijst van de grootste farmaceutische ondernemingen ter wereld.

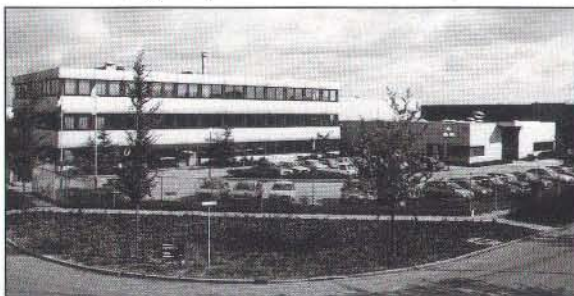
De belangrijkste doelstelling van Boehringer Ingelheim is het continueren van de activiteiten voor research en ontwikkeling van innovatieve geneesmiddelen. De onderneming

investeerde in 1987 daarvoor een bedrag van 650 miljoen Duitse Markten, hetgeen 20% van haar inkomsten uit farmaceutische producten in dat jaar uitmaakte. In 1988 is hiervoor 643 miljoen Duitse Markten geïnvesteerd, ofwel 19,0% van de totale omzet.

De research-centra van Boehringer Ingelheim bevinden zich in de Bondsrepubliek Duitsland, zowel in Ingelheim als in Biberach, in Oostenrijk (Wenen) en in Italië (Milaan). Voorts zijn er nog research-centra in

Ridgefield in de Verenigde Staten en in Kawanishi in Japan.

Enkele jaren geleden hebben, bij de dochteronderneming Dr. Karl Thomae te Biberach, onderzoek en ontwikkeling op het gebied van recombinant-DNA-technologie hoge prioriteit gekregen.



In samenwerking met Genentech Inc. uit San Francis-co, USA, heeft Boehringer Ingelheim het eerste biotechnologisch verkregen geneesmiddel op het gebied van hart- en vaatziekten -Actilyse- op grote schaal gefabriceerd en klinisch onderzocht. Dit produkt lost stolsels op in o.a. de bloedvaten van het hart, welke de belangrijkste oorzaak van het hartinfarct vormen.

Actilyse wordt geproduceerd in het nieuwe biotechnicum te Biberach, dat op 11 november 1986 in bedrijf

werd gesteld. Deze fabriek, waar alleen Actilyse kan worden geproduceerd, vergde een investering van 135 miljoen Duitse Markten.

Boehringer Ingelheim heeft thans eigen vestigingen in meer dan 80 landen, terwijl haar geneesmiddelen in meer dan 140 landen worden verkocht. In een

aantal prioriteitslanden met eigen vestigingen wordt klinisch onderzoek geëntaamd en begeleid. Nederland is één van de belangrijkste

landen waar relatief veel klinisch geneesmiddelenonderzoek wordt verricht, waardoor Boehringer Ingelheim Alkmaar in Nederland een belangrijke bijdrage levert aan de ontwikkeling van nieuwe geneesmiddelen.



**Boehringer
Ingelheim**

Boehringer Ingelheim bv
Postbus 8037
1802 KA Alkmaar
Telefoon 072-662463

NATUUR '91 & TECHNIEK

Losse nummers:
f 11,75 of 230 F.

natuurwetenschappelijk en technisch maandblad



Bij de omslag

Glasvezels dragen in belangrijke mate bij aan de ontwikkelingen in de telecommunicatie. Dunne glasdraadjes kunnen veel meer informatie transporteren dan de dikkere koperdraden, en bovendien over grotere afstanden. Hoe het telefoonnet zich heeft ontwikkeld tot haar huidige omvang en wat ons nog te wachten staat, kunt u lezen in het artikel van prof ir J.L. de Kroes op pag. 648 e.v.

(Foto: Siemens AG, München, D)

Hoofdredacteur: Th.J.M. Martens.

Adj. hoofdredacteur: Dr G.M.N. Verschuuren.

Redactie: Drs G.F.M. Hendrickx, Drs T.J. Kortbeek, Drs E.J. Vermeulen.

Redactiesecretariaat: S.H. Pauw, Drs L.P.J. Slangen.

Onderwijscontacten: W.H.P. Geerits, tel.: 0(0-31)4759-1305.

Redactiemedewerkers: Drs J. Bouma, Dr W.A. Casparie, Drs G.P.Th. Kloeg, A. de Kool, Prof dr H. Lauwerier, Drs J.C.J. Masschelein, S.M.A. Peters, Ir S. Rozendaal, Dr J. Willems.

Wetenschappelijke correspondenten: Ir J.D. van der Baan, Dr P. Bentvelzen, Dr W. Bijleveld, Dr E. Dekker, Drs C. Floor, Dr L.A.M. van der Heijden, Ir F. Van Hulle, Dr F.P. Israël, Drs J.A. Jasperse, Dr D. De Keukeleire, Dr F.W. van Leeuwen, Ir T. Luyendijk, Dr P. Mombaerts, Dr C.M.E. Otten, Ir A.K.S. Polderman, Dr J.F.M. Post, R.J. Querido, Dr A.F.J. van Raan, Dr A.R. Ritsema, Dr M. Sluysen, Dr J.H. Stel, J.A.B. Verduijn, Prof dr J.T.F. Zimmerman.

Redactie Adviesraad: Prof dr W.J. van Doorenmaalen, Prof dr W. Fiers, Prof dr H. van der Laan, Prof dr ir A. Rörsch, Prof dr R.T. Van de Walle, Prof dr F. Van Noten.

De Redactie Adviesraad heeft de taak de redactie van Natuur & Techniek in algemene zin te adviseren en draagt geen verantwoordelijkheid voor afzonderlijke artikelen.

Vormgeving: H. Beurskens, J. Pohlen, M. Verreijt.

Druk: VALKENBURG OFFSET BV, Echt (L.).

Redactie en administratie zijn te bereiken op:

Voor Nederland: Postbus 415, 6200 AK Maastricht. Voor België: Boechtstraat 15, 1860-Meise/Brussel. Tel.: 0(0-31)43 254044 (op werkdagen tot 16.30 uur). Fax: 0(0-31)43 216124.

Voor nieuwe abonnementen: 0(0-31)43 254044
(tot 20.30 uur, óók in het weekend).

Artikelen met nevenstaand vignet resulteren uit het EURO-artikelen project, waarin NATUUR & TECHNIEK samenwerkt met ENDEAVOUR (GB), LA RECHERCHE (F), BILD DER WISSENSCHAFT (D), SCIENZA E TECNICA (I), PERISCOPIO TIS EPISTIMIS (GR) en MUNDO CIENTÍFICO (E), met de steun van de Commissie van de EG.

Gehele of gedeeltelijke overname van artikelen en illustraties in deze uitgave (ook voor publicatie in het buitenland) mag uitsluitend geschieden met schriftelijke toestemming van de uitgever.

Een uitgave van

ISSN 0028-1093

EURO
ARTIKEL



Centrale uitgeverij en adviesbureau b.v.

INHOUD

SIMULATICA/Hénons dynamische systeem	X
AUTEURS	XII
HOOFDARTIKEL/Gedachtensprongen	647

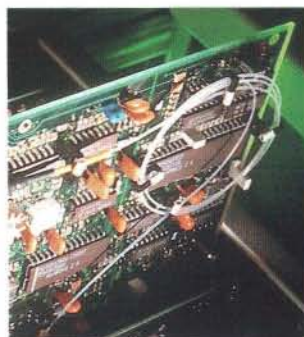
TELEFOON

648

Een wereldomvattend apparaat

J.L. de Kroes

Als we een paar knopjes indrukken, kunnen we praten met iemand aan de andere kant van de wereld. Het systeem dat dit mogelijk maakt, het telefoonnet, omspant de gehele aardbol en is de grootste machine die ooit is gebouwd. In vol bedrijf wordt het apparaat uitgebreid en vernieuwd, zodat het straks ook geschikt is voor kabeltelevisie en diensten met bewegende beelden. Het is de vraag of we straks nog van 'telefoonnet' mogen spreken. Ingenieurs die twintig jaar geleden vol trots spraken over de 'onsterfelijke machine' zullen het nog beleven dat deze wordt opgeslokt door een universeel communicatienet!



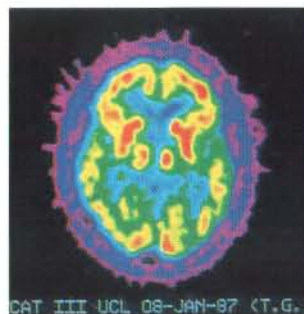
MENTALE WEERSTAND

660

Psyche en immunologie

Frank Berkenbosch

Ons geneeskundig onderzoek baseert zich vooral op de opvatting van Descartes dat lichaam en geest strikt zijn gescheiden. Maar de aandacht voor de biopsychologie, die dit dogma volslagen negeert, groeit snel. Biopsychologen richten zich op de invloed van de geestesgesteldheid op allerlei lichaamsfuncties. Vooral het afweersysteem geniet veel interesse, aangezien dit systeem een cruciale rol speelt bij het tegengaan van allerlei infecties en kanker. Bestaat er een direct contact tussen de hersenen en het afweersysteem? En zo ja, hoe vindt dat contact dan plaats?



SUPERSNAREN

672

F.A. Bais en F.A. Muller

Sinds Einstein zoeken natuurkundigen naar een unificatietheorie. Deze speurtocht leidde tot de idee van de supersnaren. Het uitgangspunt van supersnaartheorieën is, dat alle elementaire deeltjes waaruit het universum is opgebouwd, corresponderen met verschillende quantumtoestanden van een minuscule 'snaartje' ongeveer 10^{-32} mm lang. Door deze theorieën is er nu een totaal nieuwe kijk op elementaire deeltjes. In dit artikel betreden we een elementaire weg die ons een uitzicht geeft op de stormachtige ontwikkelingen binnen de theoretische natuurkunde.



NATUUR '91 & TECHNIEK

september/59^e jaargang 1991



INDRUKKEN IN KLEI

Het begin van het getal

Peter Damerow, Robert K. Englund en Hans J. Nissen

Doordat we er al jong mee leren werken is het omgaan met getallen ons zeer vertrouwd. We kunnen ons dan ook nauwelijks voorstellen wat voor geestelijke krachttoer het betekende om de aanduiding van een aantal los te koppelen van het getelde object zelf. Die stap is niet zo vanzelfsprekend, zoals onlangs bleek uit onderzoek bij enkele natuurvolkoren. Archeologen hielden daar nooit rekening mee en gingen bij de interpretatie van de oudste ons bekende, geschreven documenten – afkomstig uit Mesopotamië en zo'n vijfduizend jaar oud – steeds uit van het bestaan van zo'n getalbegrip.

696



RELIËF IN PLATTE BEELDEN

Driedimensionale bewegingsregistratie

Theo de Haan

Wat gebeurt er tijdens de afzetsfase van een hoogspringer? Wat is de beste manier van rolstoelvoortbeweging? Hoe gedraagt de kreukelzone van een auto zich bij een niet-frontale botsing? Bij de beantwoording van deze vragen bewijzen film- of video-opnamen een goede dienst. De opnamen zijn namelijk geschikt voor kwantitatief onderzoek. Hiervoor moeten we de posities van de bewegende objecten op diverse momenten kennen. Film en video leveren weliswaar een plat beeld, maar met moderne omrekentechnieken reconstrueren we uit platte registraties weer snel een nauwkeurig, ruimtelijk beeld.

708



ANALYSE & KATALYSE/De wetenschapsman Andrej Sacharov/De geboorte van het experiment

720

PRIJSVRAAG

730

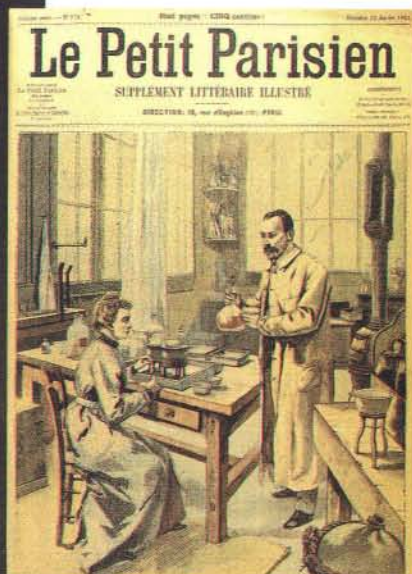


Vertrouwd raken met de wetenschap - dat is het doel van deze doe-het-zelf tentoonstelling. Een glazen bol met edelgassen onder lage druk en een radiozender in het centrum laat slierende oplichtend plasma zien zodra onze handen over het oppervlak bewegen.

WETENSCHAP EN SAMENLEVING

Wetenschap en samenleving biedt u een blik achter de schermen van het natuurwetenschappelijke bedrijf - met al zijn kracht en zwakte, met al zijn succes en falen. Bovendien verschaft dit boek u als lezer (en kijker) een diepgaand inzicht in de relatie tussen wetenschap en maatschappij. Wetenschap is veel te belangrijk om louter aan specialisten te worden overgelaten.

**De nieuwste uitgave
van Natuur & Techniek
voor onze abonnees**

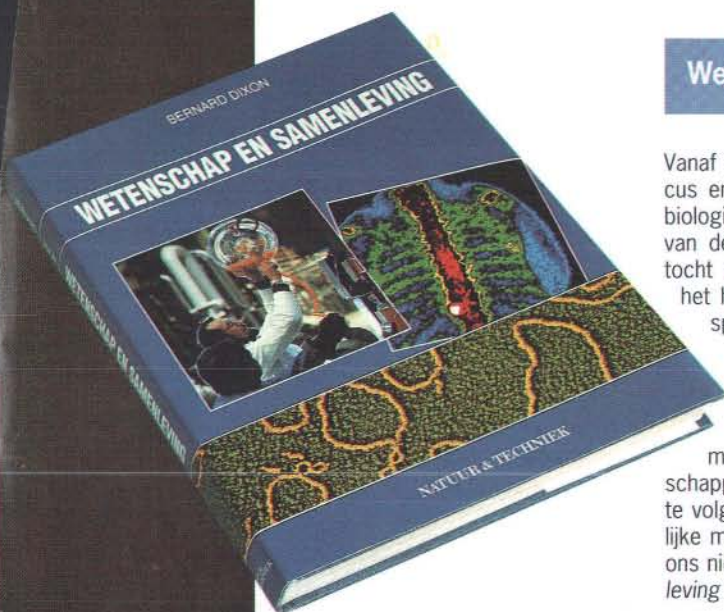


Rechts: sinds
Pierre en Marie
Curie heeft de
apparatuur
waarmee we
beter greep krij-
gen op materie
en leven een
gigantische
ontwikkeling
doorgemaakt.



Wetenschap en methode

Vanaf de klassieke oudheid, via Copernicus en Newton, tot en met de fysica en biologie van vandaag, is de geschiedenis van de wetenschap een naarstige speurtocht naar de geheimen van de materie, het heelal en het leven. Zelfs de meest spectaculaire triomfen van wetenschap en technologie - of het nu gaat om de uitroeiing van pokken of het Apollo-project dat mensen naar de maan bracht - zijn pas mogelijk geworden door in het wetenschappelijk onderzoek nauwgezette routes te volgen. In wezen zijn de wetenschappelijke methoden helder en eenvoudig, zoals ons nieuwste boek *Wetenschap en samenleving* u laat zien.



Wetenschap en controle

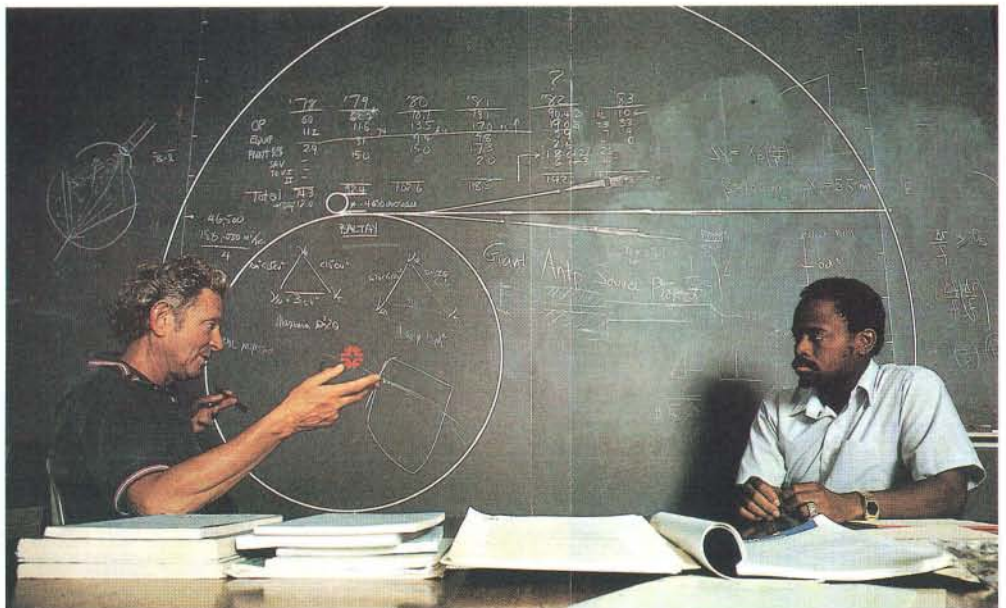
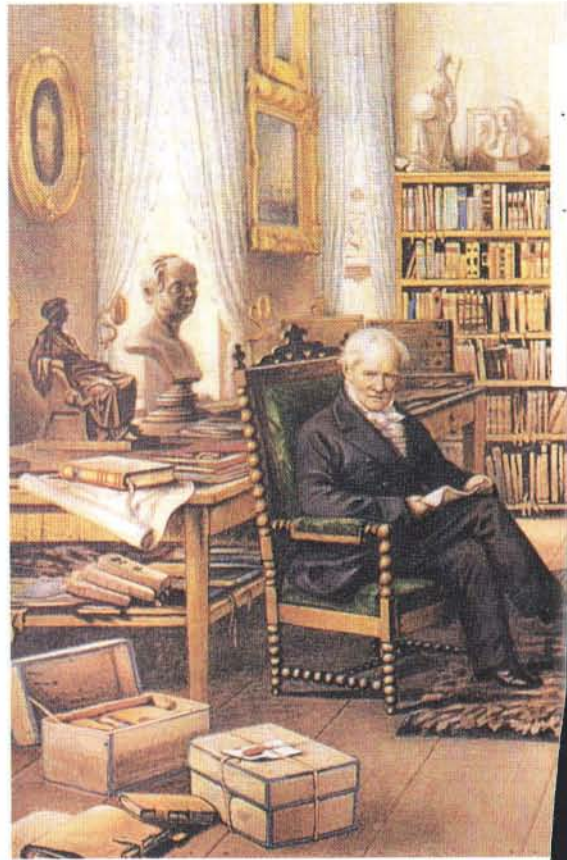
De wetenschap kent grote namen zoals Einstein, Darwin en Watson en Crick, maar toch kan de wetenschap pas goed gedijen binnen het kader van een samenwerkingsverband. Wat een individuele onderzoeker ook moge ontdekken of bedenken, het moet geijkt worden via deskundige en kritische controle. Natuurlijk blijft wetenschap mensenwerk, getuige alle wedijver, naijver, twist en fraude die we onder onderzoekers tegenkomen. *Wetenschap en samenleving* is een boek over al deze aspecten van het wetenschapsbedrijf.

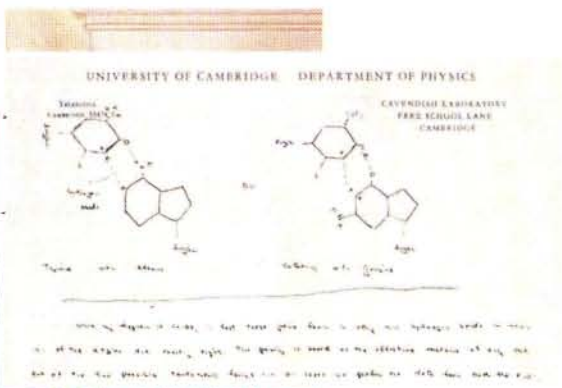
Wetenschap en maatschappij

Onderzoekers werken in researchcentra, maar ook in een samenleving. De auteur maakt in dit boek duidelijk hoe de natuurwetenschappen langzamerhand een steeds belangrijkere rol zijn gaan spelen in het doen en laten van de mens - van navigatie en architectuur tot industrie en oorlog-

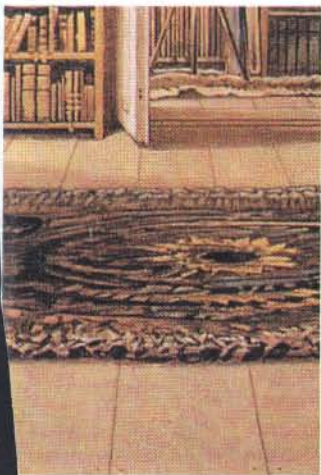
Onder: wetenschappelijk onderzoek is een kwestie van training. De fysicus en Nobelprijswinnaar Leon Lederman

maakt een jonge onderzoeker wegwijs in de wereld van onderzoek en onderzoeksmethoden.





Links: wetenschap gedijt alleen in een onderzoeksgemeenschap. Vanuit zijn werkkamer schreef Von Humboldt (tekening) vele brieven naar collega's over de hele wereld. Ook nu nog gaat wetenschappelijke communicatie vaak per brief, getuige de brief van Watson (inzet) over 'zijn' DNA-model. Toch nemen tijdschriften en symposia een steeds belangrijker plaats in.



Rechts: dit meisje kreeg na negen jaar onvoldoende groei een injectie met menselijk groeihormoon afkomstig uit *E. coli*-bacteriën. Binnen een jaar werd ze 13 cm langer.

Onder: deze tank bevat, ondergedompeld in vloeibare stikstof, zes aluminium houders. In elk daarvan zit een ingevroren mens in afwachting van revolutionaire ontwikkelingen in de medische wetenschap.



voering. In *Wetenschap en samenleving* komen de hoogtepunten aan bod, de grote namen en belangrijke theorieën die deze lange weg hebben gemarkeerd.

Steeds houdt de auteur daarbij de wisselwerking tussen de maatschappij en de wetenschappelijke wereld in het oog. Met talloze concrete en veelal recente voorbeelden wordt duidelijk gemaakt hoe de natuurwetenschappen zich hebben gericht op de behoeften van zulke uiteenlopende gebieden als defensie, gezondheidszorg, landbouw en technologische vooruitgang, maar ook welke sociale gevolgen en risico's deze ontwikkelingen met zich mee hebben gebracht.

Wetenschap en geld

Wetenschap kost handen vol geld - vooral als het om zogeheten **big science** gaat, waarvoor gigantische apparatuur nodig is, zoals deeltjesversnel-

lers. Daar staat tegenover dat de wetenschap in de vorm van technologieën, produkten en processen ook bijdraagt aan ons welzijn en aan onze economische groei. Daarom vormt de financiering van wetenschappelijk onderzoek een ander belangrijk onderwerp in dit boek.

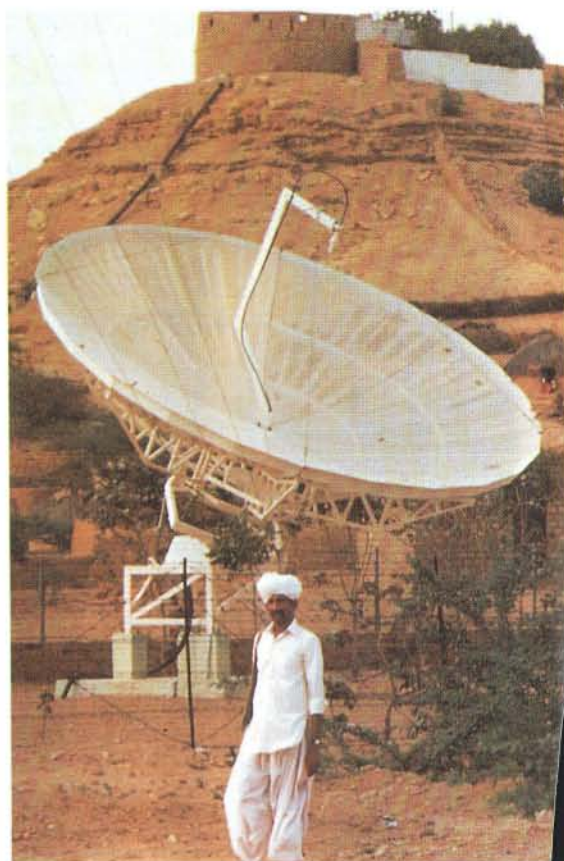
Nauw verbonden met de besluitvorming inzake de besteding van onderzoeksgelden is het publieke en politieke debat over de weldaden en de gevaren van de wetenschap. Dit heeft op zijn beurt weer te maken met zaken als wetenschappelijke scholing en kennis bij het bredere publiek. Een boek als *Wetenschap en samenleving* kan en wil daar niet omheen!



Boven: computers zijn niet meer weg te denken uit ons leven. Ze bieden ontspanning en educatie, ze overtreffen ons in snelheid en capaciteit en ze zijn betrouwbaar, maar kwetsbaar tegelijkertijd.

Rechtsboven: dankzij schotelantennes heeft dit dorp in India via satellieten toegang gekregen tot educatieve programma's uit andere delen van de wereld.

Rechts: de film *The China Syndrome* met Jane Fonda is een dramatisering van de maatschappelijke problematiek rondom kernenergie.



Enkele thema's

- Oorsprong en ontwikkeling van de wetenschap
- Onderzoeksmethoden, technieken en apparatuur
- Communicatie in de wetenschap
- Concurrentie, plagiaat en fraude
- Natuurwetenschap en religie
- Randgebieden en parapsychologie
- Wetenschappers en de atoombom
- Kernenergie en bestraling van voedsel
- Genetische manipulatie
- Alternatieve geneeskunde
- Onderwijs en popularisering van wetenschap
- Landbouw, milieu en Derde Wereld
- Toekomstvisies



- Formaat 22 x 29 cm
- Geheel in vierkleurendruk
- Gebonden in linnenband met stofomslag
- 256 pagina's met een begrippenlijst, een uitgebreide index en meer dan 400 afbeeldingen

- Prijs: f 95,- of 1860 F
- Voor onze abonnees: f 79,50 of 1550 F

Ook verkrijgbaar in de boekhandel, ISBN 90735074

Over de auteurs

Dr Bernard Dixon was jarenlang hoofdredacteur van het befaamde weekblad *New Scientist* en is Vice-President van de British Association for the Advancement of Science. Tevens is hij een van de drie oprichters van de Foundation Scientific Europe, die onlangs het boek *Wetenschap en technologie in Europa* deed uitkomen (de Nederlandstalige editie is verschenen bij *Natuur & Techniek*).

Tevens verleenden medewerking en advies: Dr Susan Blackmore, universiteit van Bristol, Prof Paul Davies, universiteit van Newcastle, Eugene Garfield, oprichter van het Institute for Scientific Information, Robin Holloway, National Institute for Molecular Research in Londen, Prof Jack Meadows, universiteit van Loughborough, Zhores Medvedev, National Institute for Medical Research te Londen, Prof John Ziman, Fellow of the Royal Society.

SIMULATICA

Prof dr
H.A. Lauwerier

Hénons dynamische systeem

Bij een dynamisch systeem kunnen we het beste denken aan de beweging van hemellichamen. De enige werkzame kracht waar we dan rekening mee houden is de zwaartekracht, die de beweging van de hemellichamen volgens de wetten van Newton bepaalt. Bij het drielielichamenprobleem, een model met drie bewegende massapunten, volgt meestal ieder punt een zeer ingewikkelde ruimtekromme. Die heeft wel wat weg van een verwarde kluwen die alsmaar dikker of voller wordt. Een dynamisch systeem kenmerkt zich door een aantal vrijheidsgraden. Bij het drielielichamensysteem zijn dat er in totaal achttien, omdat bij elk massapunt positie en snelheid voor punt tellen.

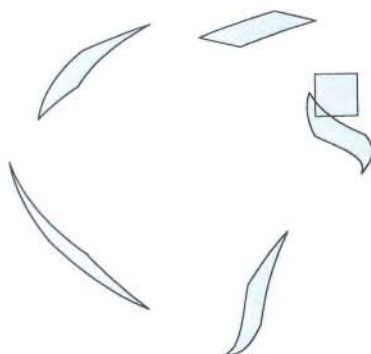
Maken we gebruik van de behoudswetten van de mechanica die betrekking hebben op het impulsmoment en het draaiimpulsmoment, dan kunnen we daarop een zestel in mindering brengen. Er blijven dan nog altijd twaalf over. We kunnen de toestand van het systeem op een zeker moment opvatten als een rijtje van twaalf getallen of, in meetkundige taal, als een punt in een twaalfdimensionale ruimte, een zogenaamde *faseruimte*. In de loop van de tijd beschrijft dat punt een ingewikkelde ruimtekromme, de zogenaamde *fasekromme*, waar ook weer het beeld van een kluwen draad bij past. Omdat ge-

durende de beweging ook de som van kinetische en van potentiële energie constant blijft, wil dat in meetkundige taal zeggen dat die kromme zelf weer ligt op een hoger dimensionaal oppervlak van constante energie.

Poincaré heeft een schitterende truc bedacht om enig inzicht te verkrijgen in de gecompliceerde meetkundige structuur van zo'n faseruimte. Hij bekijkt daarbij de doorsnede van de ruimtekromme met een willekeurig vlak, en laat op de snijfiguur in dat vlak zijn wiskundig vernuft los. Elk punt P in dat snijvlak kan dienen als vertrekpunt van de fasekromme. Voor het wiskundige drielielichamenprobleem wil dat zeggen dat de beweging van het stelsel volledig is bepaald zodra we op een beginpunt zowel de posities als de snelheden van de drie massapunten voorschrijven. Op een bepaald moment passeert de fasekromme het snijvlak weer in een punt dat we Q noemen. Bij elk punt P van het snijvlak hoort zo een tweede punt Q, wat een definitie inhoudt van een afbeelding van het vlak op zichzelf. Uiteraard is deze methode ook op allerlei andere mechanische systemen toepasbaar, maar de kern is steeds dat we het ingewikkelde gebeuren in een meer-dimensionale ruimte terugbrengen tot de analyse van een punt-punt afbeelding in een plat vlak.

Hénon, ook bekend van de door hem

```
10 REM ***TRANSFORMATIE VAN EEN CIRKEL***
20 REM ***NAAM:HENONC***
30 CLS : PRINT"Toets 9 voor EGA of 12 voor VGA"
40 INPUT"Scherma = ",SCR
50 SCREEN SCR : CLS : KEY OFF
60 WINDOW (-2,-1.5)-(2,1.5)
70 DIM X(10),Y(10)
80 A=.24 : B=SQR(1-A^2) : PI=4*ATN(1)
90 XC=.8 : YC=.2 : R=.2 : N=400
100 FOR I=0 TO N : T=2*PI*I/N
110 X(0)=XC+R*COS(T) : Y(0)=YC+R*SIN(T)
120 PSET (X(0),Y(0))
130 GOSUB 150 : NEXT I
140 A$=INPUT$(1) : END
150 FOR K=0 TO 3
160 X(K+1)=A*X(K)-B*(Y(K)-X(K)*X(K))
170 Y(K+1)=B*X(K)+A*(Y(K)-X(K)*X(K))
180 PSET (X(K+1),Y(K+1))
190 NEXT K : RETURN : END
```



gevonden vreemde aantrekker, vroeg zich af wat het eenvoudigste wiskundige model van zo'n afbeelding is. Hij ging uit van een eenvoudige rotatie, in coördinaten beschreven door

$$x' = x \cos(\alpha) - y \sin(\alpha) \text{ en}$$

$$y' = x \sin(\alpha) + y \cos(\alpha),$$

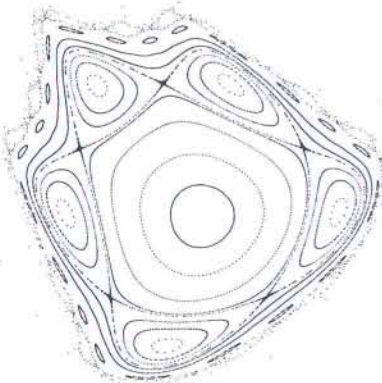
en aan de rechterleden voegde hij nog een tweedegraadsterm toe. Het mooie van Poincaré's methode is dat de afbeelding in de doorsnede ook iets laat zien van de wet van behoud van energie. Die afbeelding is namelijk oppervlaktebehoudend, en dat legt beperkingen op aan de wijze van toevoeging. In 1969 kwam Hénon met de volgende heel eenvoudige uitbreiding:

$$x' = a x - b(y - x^2) \quad y' = b x + a(y - x^2),$$

waarbij a en b de betekenis hebben van $\cos(\alpha)$ en $\sin(\alpha)$.

Door de afbeelding telkenmale opnieuw toe te passen, vormen we uit een willekeurig gekozen beginpunt P_0 een onbepaald doorlopende puntenbaan P_1, P_2, P_3, \dots die we kunnen zien als de doorsnede van een fasekromme in een fase-ruimte.

In de tekening op de linker pagina laten we zien dat de afbeelding inderdaad



oppervlaktebehoudend is. Daartoe kiezen we een beginfiguur en we onderwerpen de punten van het figuur op *iteratieve* wijze vijfmaal aan dezelfde afbeelding. We zien hoe de beeldfiguren met de gekozen hoek α een draaiing van ongeveer 72° (in vijf slagen rond) ondergaan en daarbij vervormen. Het omsloten oppervlak blijft daarbij gelijk. Met het programma HENONC kunnen we datzelfde ook voor andere cirkels doen. Met een kleine aanpassing kan het programma de iteratie nog verder voortzetten.

Wanneer we een dynamisch systeem

willen onderzoeken, is het raadzaam om zo maar eens wat verschillende banen op het beeldscherm zichtbaar te maken. Het programma HENON1 kiest daarvoor een willekeurig beginpunt en berekent daarvan een baan van zeg vijfhonderd punten. Omdat voor sommige startpunten de baan naar oneindig kan wegvluchten, bevat het programma een noodzakelijke beveiliging op regel 140.

De resultaten, in de linker kolom getekend, zijn fascinerend. Mede bevestigd door de theorie zijn er verschillende soorten banen. Sommigen zijn perio-

```

10 REM ***HENONS QUADRATISCHE SYSTEEM***
20 REM ***Druk toets voor einde programma***
30 REM ***NAAM:HENON1***
40 CLS : PRINT"Toets 9 voor EGA of 12 voor VGA"
50 INPUT"Scherf = ",SCR
60 SCREEN SCR : CLS : KEY OFF : RANDOMIZE 1
70 WHILE INKEY$=""
80 WINDOW (-1,-.75)-(.75)
90 X=-.4+RND : Y=-.4+RND
100 A=.24 : B=SQR(1-A^2)
110 FOR N=1 TO 500 : PSET (X,Y)
120 Z=X : X=A*X-B*(Y-X*X)
130 Y=B*Z+A*(Y-Z*Z)
140 IF ABS(X)+ABS(Y)>10 THEN GOTO 160
150 NEXT N
160 WEND : A$=INPUT$(1) : END

```

die, waarbij een bepaald aantal punten steeds weer wordt herhaald. De stabiele cycli herkennen we als centra van kringetjes, de instabiele hebben hun plaats in overgangsgebieden waar twee opvolgende lusjes elkaar raken, zogenaamde periodieke zadelpunten. Er zijn banen die bijna periodiek zijn, herkenbaar aan groepen van lusjes. Het zouden doorsneden kunnen zijn van een in zichzelf gesloten kronkelbuis in de ruimte. Tenslotte, heel belangrijk, zijn er chaotische banen waarvan de baanpunten een groot gebied beslaan. Een enkele chaotische baan verschaft, mits voldoende ver doorgezet – met de computer is een miljoen baanpunten geen probleem – een soort negatief van de geordende banen, de banen die uit losse punten en groepen van lusjes bestaan. In de laatste tekening beelden we een gedeelte van een dergelijke chaotische baan af. Het beginpunt van de baan is (.575,.16) en de afmetingen van het getoonde venster zijn .16 bij .12. De a -waarde is die van het nevenstaande programma.



Het **nieuwste** boek uit de
Wetenschappelijke Bibliotheek

NAVIGATIE IN DE NATUUR

NAVIGATIE IN DE NATUUR

Meesters in de stuurmanskunst

Talbot H. Waterman



Meesters in de stuurmanskunst

Talbot H. Waterman, Yale University

Telkens opnieuw weten postduiven hun weg terug te vinden, de zalm gaat eens in zijn leven terug naar de plaats waar hij ter wereld kwam en de monarchvlinder kan duizenden kilometers afleggen naar plekken waar hij nooit eerder is geweest. Vele dieren zijn 'trekkers', soms over grote afstanden. Welke technieken gebruiken dieren om zulke gecompliceerde staaltjes van stuurmanskunst te volbrengen? Waterman laat in dit boek uitvoerig en helder zien hoe dieren op diverse manieren hun eigen 'kompas', 'landkaart' en 'klok' hebben ontwikkeld om hun route te vinden. Ook gaat hij in op de vraag waar dergelijke trektochten voor dienen.

Dit is deel 24 uit de Wetenschappelijke Bibliotheek van Natuur & Techniek: 256 pagina's met 190 afbeeldingen in vierkleurendruk.

Prijs: f 74,50 of 1460 F.

Voor abonnees van Natuur & Techniek:

f 59,50 of 1165 F.

Voor leden van de Wetenschappelijke Bibliotheek:

f 49,75 of 975 F.

**Informatie en bestellingen tot 16.30 uur:
0(0-31)43.254044**

AUTEURS

Prof ir J.L. de Kroes ('Telefoon') werd in 1924 geboren te Overschie. In 1948 sloot hij zijn studie elektrotechniek af in Atlanta, Georgia. Hij werd in 1958 hoofd van de afdeling Automatische Telefoon van Philips. In 1966 volgde zijn benoeming tot hoogleraar te Delft, waar hij de vakgroep Telecommunicatie- en Verkeersbegeleidingssystemen in 1988 verliet met emeritaat.

Dr F. Berkenbosch ('Immunologie') studeerde van 1973 tot 1979 medische biologie aan de Vrije Universiteit te Amsterdam, waar hij in 1983 promoveerde. Thans verricht hij daar onderzoek met een fellowship van de KNAW. Hij ontving in 1987 de Sandozprij voor zijn proefschrift, en in 1988 de Organonprijs voor Endocrinologie.

Drs Th. de Haan ('Platte beelden') studeerde van 1979 tot 1986 natuur- en sterrenkunde aan de Universiteit van Amsterdam. Vanaf 1987 werkt hij aan de Faculteit Bewegingswetenschappen van de Vrije Universiteit Amsterdam.

Drs F.A. Muller ('Supersnaren'), behaalde in 1989 het doctoralexamen theoretische natuurkunde aan de Amsterdamse Vrije Universiteit. Thans is hij werkzaam als aio bij de vakgroep Geschiedenis en Grondslagen van de Wiskunde en Natuurwetenschappen te Utrecht.

Prof dr ir F.A. Bais ('Supersnaren') behaalde in 1973 het ingenieursexamen aan de TH Delft. In 1977 promoveerde hij aan de universiteit van Californië. Bais werkte onder andere bij de universiteit van Leuven en CERN, voordat hij in 1985 werd aangesteld tot gewoon hoogleraar in de Theoretische Natuurkunde aan de VU Amsterdam.

Dr P. Damerow ('Getallen') is sinds 1975 een medewerker aan het Max-Planck-Instituut für Bildungsforschung in Berlijn. In 1977 promoveerde hij te Bielefeld. De laatste acht jaar onderzoekt hij de samenhang tussen de ontwikkeling van culturen en het ontstaan van cognitieve structuren.

Dr R.E. Englund ('Getallen') is wetenschappelijk medewerker van de Berlijnse vrije universiteit.

Prof dr Nissen ('Getallen') promoveerde in 1964 aan de universiteit van Heidelberg. Sinds 1971 bekleedt hij de leerstoel vroeg-aziatische oudheidskunde aan de Berlijnse vrije universiteit.

Vertaler

Bij het artikel *Kostbare precisie* van W. Frese en F. Cramer in het augustusnummer 1991 van Natuur & Techniek, hebben wij niet vermeld dat drs J. Bouma, docent chemiedidactiek aan de Amsterdamse VU, de oorspronkelijke tekst voor ons vertaalde. Onze excuses voor dit verzuim.

Gedachtensprongen

Een spannend begin van het nieuwe academisch jaar in Natuur & Techniek; van een reconstructie van het prilleste begin van de wetenschap, het telsysteem dat de Mesopotamiërs vijf millenia terug ontwikkelden, tot een misschien nog onvolgdragen nieuwe vrucht van de theoretische natuurkunde, die ons wel over de eeuwwisseling heen zal tillen, en daarbij een allereerste aanzet tot begrip hoe het in vredesnaam mogelijk is dat mensen dat allemaal doen.

De Mesopotamiërs, waarschijnlijk de eersten die permanente nederzettingen en een soort gestructureerde economie kenden, hadden ook de behoefte aan tellen. Maar, zo komt naar voren in het artikel van Damerow, Englund en Nissen (p. 696), ze zagen nog niet het nut van het gebruiken van dezelfde eenheden voor het meten van graan als voor het meten van wortels of wol. Tellen was altijd een concrete bezigheid en 'getallen' als 10 of 741 konden niet los van concrete objecten worden gezien. Iets als rekenen of wiskunde was dus onmogelijk — en die lieten dan ook nog zo'n duizend jaar op zich wachten. Dat is langer dan het tijdsbestek tussen de allereerste westerse contacten met de arabische wetenschap en het optreden van het *Princeton String Quartet* uit het artikel van Bais en Muller (p. 672). Maar misschien is de sprong van een aantal concrete objecten naar een abstract getal ook wel groter dan die van de alchemie van Avarroës naar een allesomvattende abstracte theorie van de fundamentele krachten. Er is psychologisch en zelfs filosofisch niet zo heel veel verschil tussen de steen der wijzen en de Grand Unifying Theory — beide geven inzicht in alle raadselen van het heelal en het is de vraag of het edele goud dat met de steen der wijzen te vervaardigen was, wel echt verschilt van de Nobelprijs voor natuurkunde die geheid ten deel zal vallen aan de opsteller van een acceptabele theorie die de vier basiskrachten verenigt. Daarentegen is voor de van-de-hand-in-de-tand levende Mesopotamiër moeilijk in te zien wat je aan zou moeten met getallen die totaal niets te maken hebben met de dingen die je gevoed of warm houden. De overgang van het aantal objecten naar een abstract getal waarmee je alles zou kunnen tellen is dan ook gigantisch.

Misschien wel het wonderlijkste is, dat mensen toch zo'n overgang maken en dat we het niet kunnen laten daarmee door te gaan tot aan het beschouwen van deeltjes als snaren. Wanneer we geen beroep willen doen op hogere machten die op mystieke wijze een geest in de mens plaatsen, zullen we daarvoor moeten kijken naar het in de evolutie ontstane systeem. Berkenbosch zet op p. 660 een allereerste stapje in die richting.



EEN WERELDOMVATTEND



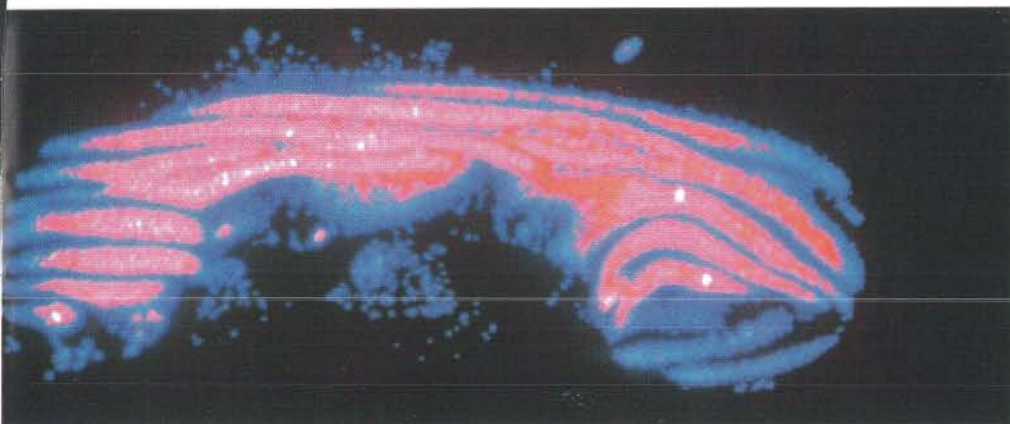
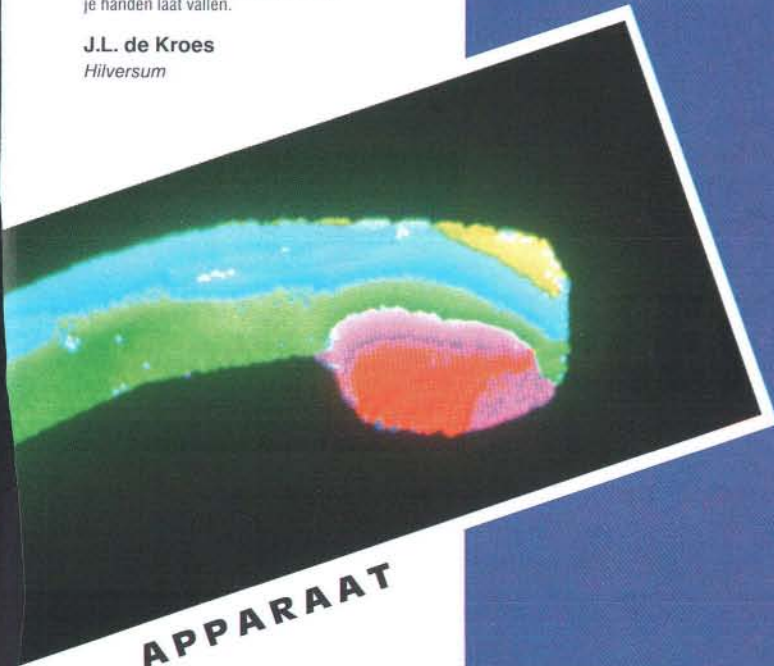
Iemand in Lokeren hoeft slechts op een paar knopjes te drukken om met zijn neef in Los Angeles te kunnen praten. Het systeem dat dit mogelijk maakt, het telefoonnet, is de grootste machine die ooit is gebouwd. Het omspannt de omtrek van de aarde en bevat ook satellieten die op grote hoogte schijnbaar stil boven de evenaar staan. Het telefoonnet groeit nog steeds, mede als gevolg van nieuwe toepassingen zoals auto-telefoon, datacommunicatie, telefax en beeldschermdiensten. In vol bedrijf wordt het steeds verder uitgebreid en vernieuwd, zodat het straks ook geschikt is voor bijvoorbeeld kabeltelevisie en diensten met bewegende beelden. Het is de vraag of we het op den duur nog 'telefoonnet' mogen noemen. Telefoon-ingenieurs die twintig jaar geleden vol trots spraken over de 'onsterfelijke machine' zullen het nog beleven dat deze wordt opgeslokt door een universeel communicatienet!

Het telefoonnet heeft een snelle ontwikkeling doorgemaakt. Het zijn niet alleen de elektronica en de glasvezeltechnieken die we nauwkeurig onderzoeken. Nog voordat deze tot het nieuwe vakgebied van de ergonomie kon worden gerekend, werd al grote zorg besteed aan de aanpassing van het net (overdracht van het spraaksignaal) en het telefoon-toestel aan de mens. Ook de gebruikersbestendigheid van apparatuur is belangrijk. Holografische interferometrie toont, met behulp van laserlicht, welke spanningen in het plastic optreden als je een hoorn uit je handen laat vallen.

J.L. de Kroes
Hilversum

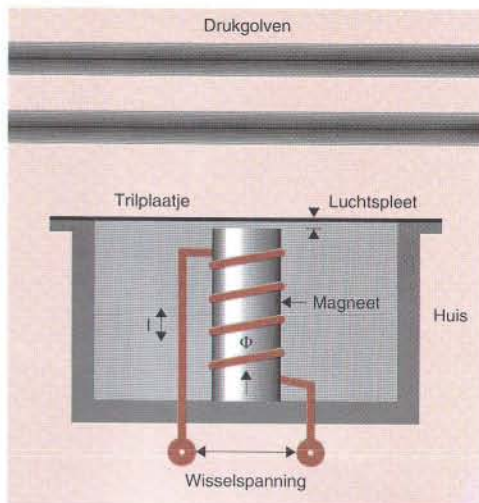
TELEFOON

APPARAAT



Het telefoonnet heeft zijn huidige omvang in nauwelijks honderd jaar bereikt. In 1876 demonstreerde de keel-, neus- en oorarts Alexander Graham Bell het eerste telefoontoestel in een kleine, achteraf gelegen 'stand' op een tentoonstelling te Philadelphia. Bell, die doofstommen leerde spreken, had het apparaat ontwikkeld om spraak zichtbaar te maken voor doven. Het bezoek van keizer Pedro van Brazilië, die de leraar van zijn doofstomme nicht wilde ontmoeten, zorgde voor de broodnodige publiciteit.

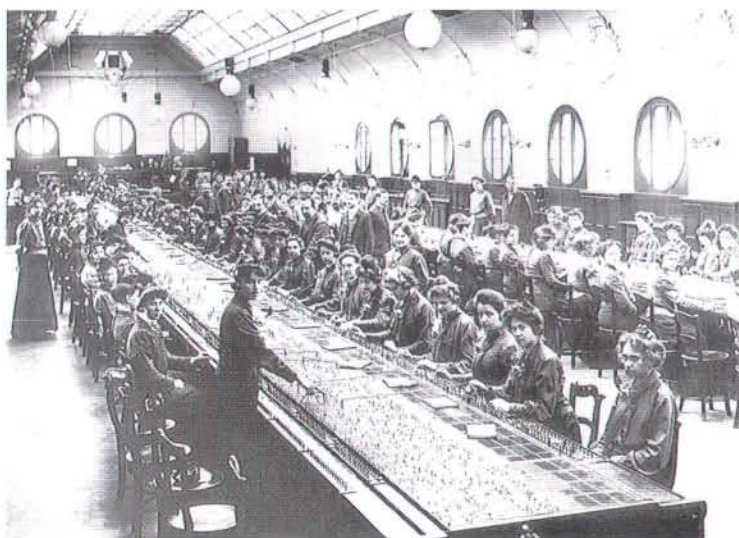
Deze oertelefoon kunnen we gemakkelijk demonstreren als we twee telefooncapsules (het hoorgedeelte) uit een moderne telefoonhoorn onderling verbinden met twee koperdraden. Zo'n capsule zet de geluidsgolf om in een elektrische stroom die daar analoog aan verloopt (afb. 1). Omgekeerd kan een telefooncapsule de variërende elektrische stroom weer omzetten in een analoog daaraan verlopende geluidsgolf. Verdere onderdelen, zoals batterijen, zijn niet nodig. Men spreekt in de ene capsule en luistert aan de andere. Er is nog geen scheiding tussen de microfoon- en de telefoonfunctie; in de loop van een gesprek gaat de capsule telkens van oor naar mond en omgekeerd. Op deze wijze kan men een aantal kilometers overbruggen, maar door de onontkoombare verliezen wordt het geluid met het toenemen van de afstand steeds zwakker.



1

1. De schakeling van Bell gaat uit van twee telefooncapsules die als microfoon en als luidspreker kunnen fungeren. Een telefooncapsule bestaat uit een ijzeren huis. Een permanente magneet in het huis trekt een stalen trilplaat aan, waarbij een kleine luchtspleet tussen de magneet en de trilplaat overblijft. Als de capsule als microfoon fungeert, zorgt een drukgolf dat de trilplaat beweegt. De daardoor veran-

derende luchtspleet doet de magnetische flux Φ veranderen. Dit induceert in de spoel een wisselspanning die analoog aan de drukgolf verloopt. Als de capsule als telefoon werkt, veroorzaakt een wisselstroom een veranderende flux en daardoor een wisselende aantrekkingskracht tussen de magneet en de trilplaat. Dit heeft tot gevolg dat de trilplaat een drukgolf opwekt analoog aan wisselstroom.



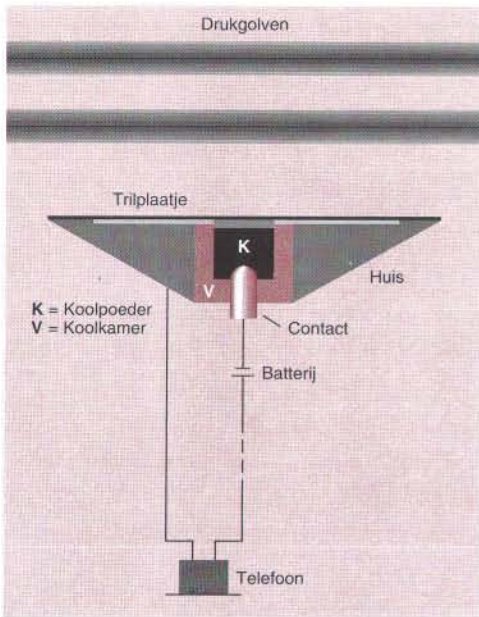
2



3

2. In 1906 zorgden vele telefonisten in een grote Berlijnse centrale voor het doorschakelen van de verbinding.

3. In 1908 kwam dit apparaat op de markt. Nu kon de gebruiker zelf het nummer draaien op de kiesschijf.



4

4. In een microfooncapsule drukt een geleidende trilplaat koolpoeder samen in een elektrisch geïsoleerde koolkamer. Het huis is geleidend. Een drukgolf beweegt de trilplaat zodat het poeder verder wordt samengeperst. Daardoor neemt de elektrische weer-

stand tussen de trilplaat en het contact af en neemt de stroom die afkomstig is van de batterij toe. Zo ontstaat er in de telefoonlijn een wisselstroom die analoog is aan de drukgolf en die in de telefoon aan de andere zijde het overeenkomende geluid opwekt.

Microfoon

Voor verder vergroten van het bereik was het nodig om het spraaksignaal te versterken. Omdat er nog geen elektronica bestond, was dat moeilijk. De oplossing werd gevonden in de koolmicrofoon, waarbij de geluidsgolf via een trilplaat een hoeveelheid poederkool samendrukt (afb. 4). Als de poederkool wordt samengedrukt, verandert de elektrische weerstand. Wanneer nu een stroom door de poederkool loopt, verandert de sterkte van die stroom als gevolg van de geluidsgolven die de kool samendrukken. Omdat er maar weinig geluidsenergie nodig is voor het besturen van de elektrische stroom, ontstaat versterking; de combinatie van microfoon en telefoon kan zo'n duizend kilometer overbruggen. De eigenschappen van de koolmicrofoon zijn echter niet

ideaal; onaardig gezegd: het is eigenlijk een slecht contact dat allerlei bijgeluiden produceert, de welbekende ruis.

De micro-elektronica is tegenwoordig zo goedkoop dat we probleemloos de koolmicrofoon met zijn hoog ruisniveau kunnen vervangen door een vaste-stofmicrofoon met aangebouwde versterker. Het zal echter nog geruime tijd duren voordat de laatste koolmicrofoon uit het net zal zijn verdwenen.

Met de komst van de microfoon krijgt het telefoontoestel de huidige vorm, die bestaat uit een microfoon om in te spreken, een telefoon (door niet-technici ook wel luidspreker genoemd) om aan te luisteren en een vork- of antilokaalschakeling die verhindert dat iemand keihard in het eigen oor spreekt. De luidspreker blijft echter, net als in de schakeling van Bell, ook als microfoon werken, zij het zonder versterking. Degene die alleen de microfoon afdekt om overleg aan zijn zijde verborgen te houden voor zijn gesprekspartner, kan dit tot zijn schade ervaren.

Het telefoonnet

Het is volstrekt oneconomisch om lijnen aan te brengen tussen elk tweetal abonnees dat mogelijk ooit met elkaar zou willen telefoneren. Bij een aantal n abonnees zijn voor een dergelijk net (een mazennet genoemd), namelijk $n(n-1)/2$ lijnen nodig. Voor een stad als Amsterdam met vierhonderdduizend abonnees zou dat neerkomen op tachtig miljard lijnen, waarvan de meeste nooit zouden worden gebruikt. Elke abonnee wordt daarom sinds de begintijd door middel van een *sternet* met een lokale telefooncentrale verbonden, waar telefonisten klaar staan om de gewenste verbindingen tot stand te brengen. Er zijn dan evenveel lijnen nodig als abonnees. Om de lengte van de abonneelijn te beperken, zijn de gebruikers in steden van een zekere omvang verdeeld over een aantal wijkcentrales. Interlokale lijnen verbinden de lokale centrales met elkaar; zo ontstaat een samenhangend interlokaal net. Als het aantal centrales groot is, kiest men ook hier voor een *sternet*.

Bij een telefoonnet met een omvang zoals we dat zien in België of Nederland, voldoet een getrappt *sternet* beter. In zo'n net zijn verschillende rangen te onderscheiden en het net lijkt hiermee op een grote hiërarchische organisatie.

Een groep van centrales met dezelfde rang vormt een sternet met een centrale van hogere rang in het centrum. Vergeleken met het onge-trapte sternet voor dezelfde centrales, heeft het getrapte sternet gemiddeld kortere verbindingen. Een voorbeeld hiervan is gegeven in afbeelding 7. Een verbinding van abonnee A naar de abonnees B_1 en B_2 gaat eerst langs de hiërarchische weg naar boven totdat zij, afdalend langs de hiërarchische weg, respectievelijk B_1 en B_2 kan bereiken.

Om het volume van het telefoonverkeer goed te kunnen verwerken, zijn twee centrales meestal door middel van meer lijnen met elkaar verbonden. Het aantal lijnen is afhankelijk van het spitsuur-verkeer tussen die centrales. Bij voldoende verkeer is het bovendien voordelig om verbindingen in het net aan te brengen die niet in het schema passen. Als deze niet-hiërarchische verbindingen (weergegeven met NH in afbeelding 7) bezet zijn, blijft de hiërarchische weg als overlooproute beschikbaar.

De nationale telefoonnetten zijn onderling verbonden tot een wereldomspannend net. Ook dit internationale net heeft de vorm van een getrapst stervormig net met veel niet-hiërarchische verbindingen. Op het hoogste niveau is hier een mazennet aanwezig.

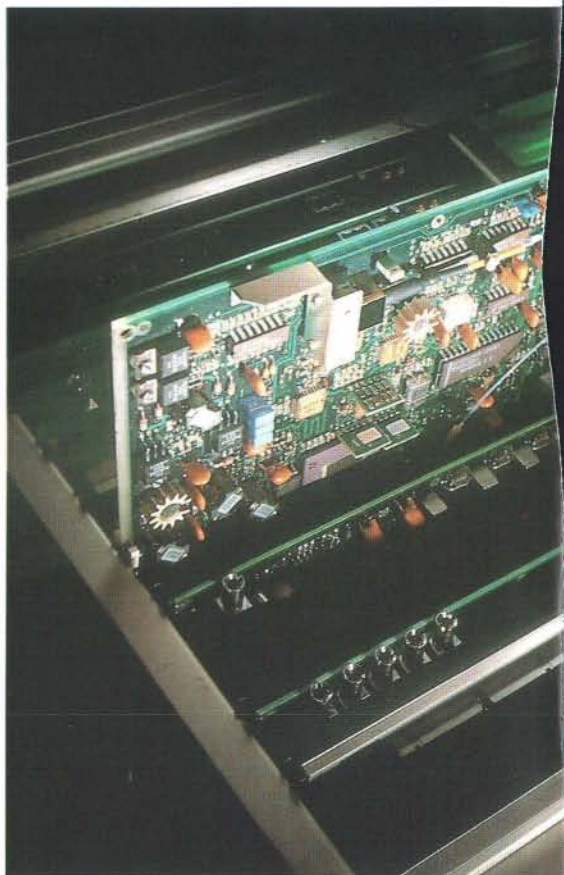
Automatisering

Al vroeg in de honderdjarige geschiedenis van het telefoonnet begint de vervanging van telefonisten door automatische apparatuur. De initiatiefnemer van het eerste automatische telefoonsysteem van 1891 – Almon B. Strowger, van beroep begrafenisondernemer – had daarvoor een heel bijzonder motief; hij had het sterke vermoeden dat hij klanten uit de gegoede burgerij (de enigen die toen telefoon hadden) verloor aan een concurrent, die van zijn vriendin, de plaatselijke telefoniste, te horen kreeg wie vaak de dokter belde. Automatisering was voor Strowger het geëigende middel om dit soort onfaire praktijken te voorkomen.

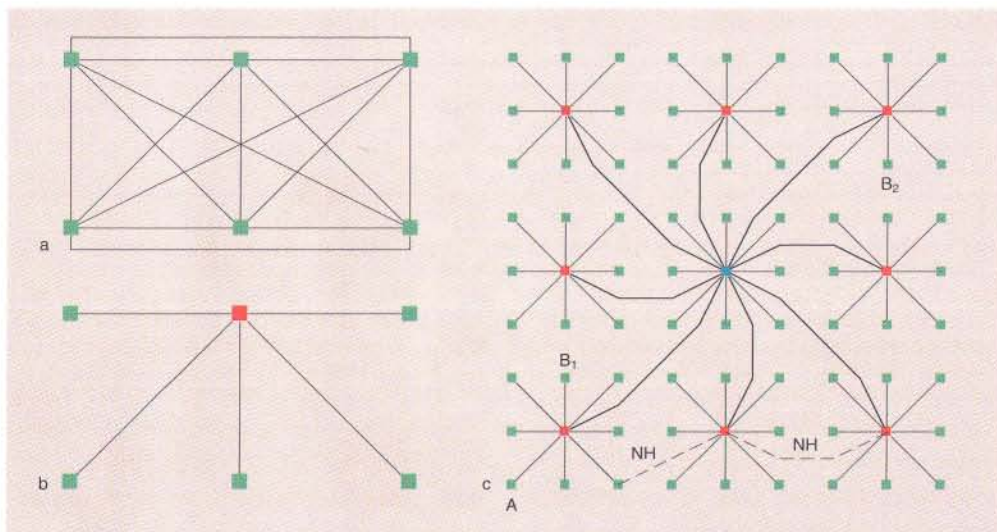
De eerste schakelaars van de automatische telefonie bootsten de telefonisten na; het waren eenarmige robots die verbindingen tot stand brachten. Later deden eenvoudiger schakelaars hun intrede, nadat men fundamenteeler over het verbindingsprobleem had nagedacht. Door de toegenomen aandacht voor bedrijfsvoering en automatisch onderhoud (controle



5



6



7

5. Een monteur in het Verre Oosten controleert de pasgelegde kabels. Het telecommunicatienet breidt zich nog steeds over de aardbol uit.

6. In sommige moderne telefooncentrales hebben ISDN, breedband- en glasvezeltechnieken hun entree gemaakt. Ook kunnen steeds meer gebruikers telefoontoestellen met tooncode gebruiken, waarbij de combinatie van twee tonen aangeeft welke toets is ingedrukt. We kunnen de komende jaren nog vele vernieuwingen verwachten.

7. In een mazennet zijn alle abonnees met elkaar verbonden (a). Om het aantal lijnen terug te brengen, kan men een sternet aanleggen waarin abonnees met elkaar zijn verbonden via een centrale (b). In een getrapst sternet zijn diverse centrales eveneens in een sternet geschakeld met een centrale van een hogere orde in het centrum (c). Deze laatste is met centrales van dezelfde orde weer stervormig verbonden met een centrale van nog hogere orde. Niet-hiërarchische verbindingen (NH) verhogen de efficiëntie van het net.

1209 Hz	1336 Hz	1477 Hz	
1	2	3	697 Hz
4	5	6	770 Hz
7	8	9	852 Hz
*	0	□	941 Hz

op het functioneren, doormeten, foutzoeken, blokkeren van defekte delen, herindelen van verbindingen, aan- en afsluiten van abonnees) nam de complexiteit van de besturing van de centrales toch geleidelijk toe.

In 1970 doen computers voor het besturen van de telefooncentrales hun intrede. Enige jaren later worden ook de schakelaars elektronisch. Om de toegenomen schakelsnelheid van de centrales beter te kunnen benutten, vervangt

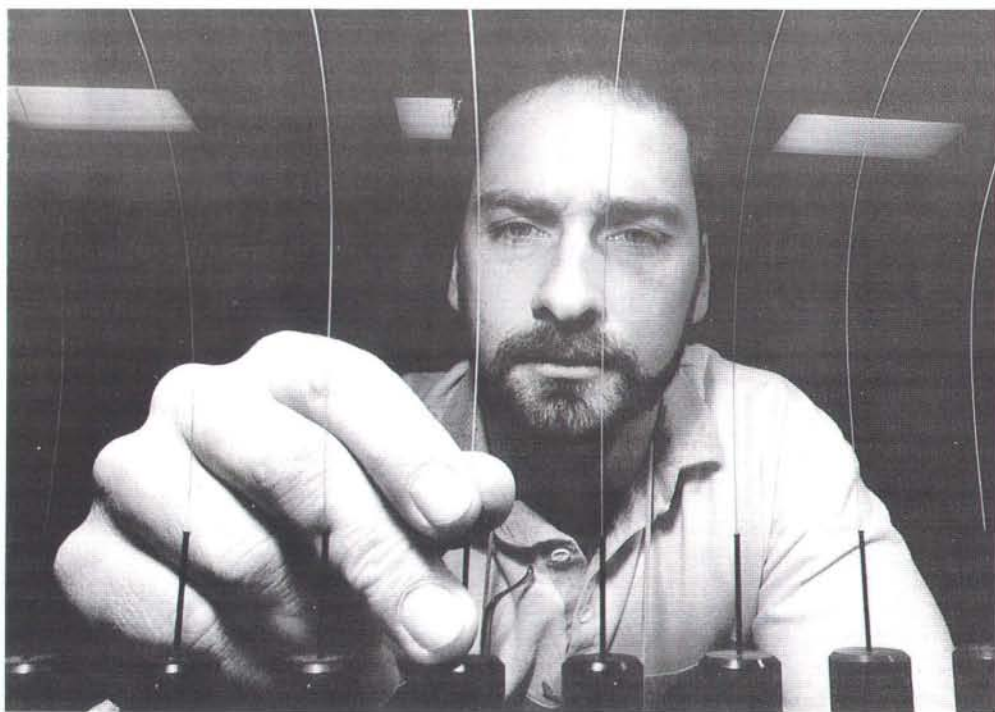
Digitale overdracht — Puls code modulatie (PCM)

In de praktijk blijkt dat we kunnen volstaan met het overdragen van een deel van het gehele spraaksignaal in de vorm van pulsen. In afbeelding I-1 is deze zogenaamde *puls code modulatie* van een signaal schematisch weergegeven. Het spraaksignaal (S1) wordt regelmatig bemonsterd (I-1a). Het teken (positief of negatief) en de grootte van de monsters wordt vervolgens in pulspatronen gecodeerd (I-1b). Het signaal gaat in deze codevorm naar de ontvangtzijde, waar het wordt vertaald in pulsen met een amplitude die overeenkomt met de codering van de pulspatronen (I-1c). Na het passeren van een laagdoorlaatfilter ontstaat een spraaksignaal dat analoog is aan het oorspronkelijke signaal (I-1d).

De bemonsteringsfrequentie moet minstens tweemaal zo groot zijn als de frequentie van de hoogste over te brengen toon. In het geval van spraak heeft de hoogste toon een frequentie van 3400 Hz, naar boven afgerond tot 4000 Hz. Voor de telefonie is dan de bemonsteringsfrequentie 8 kHz voldoende. Hierbij is de afstand tussen de monsters 125 μ s. Bij *compact discs*, waarbij men ook veel hogere frequenties wil reproduceren, past men een bemonsteringsfrequentie van 41,3 kHz toe.

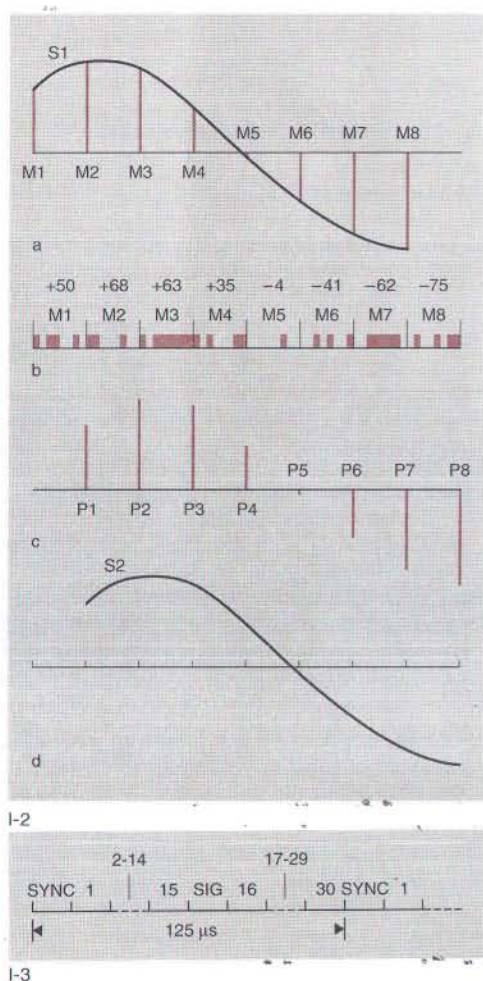
Voor de telefoonkwaliteit volstaat een codering van teken en grootte van de monsters met 8 bits. We zetten het spraaksignaal bij telefonie dus om in een (digitale) pulsstroom van $8000 \text{ Hz} \times 8 \text{ bits} = 64 \text{ kbit s}^{-1}$. Zouden we spraaksignalen met CD-kwaliteit willen versturen, dan zou vanwege de extra informatie een codering nodig zijn van 14 bits.

We kunnen meer gesprekken tegelijkertijd versturen door ze te stapelen. Dit stapelen geschiedt bij PCM door de pulsen van dertig gesprekken achter elkaar te plaatsen en deze signalen aan de ontvangtzijde weer te splitsen. Aan het begin van elke cyclus van 125 μ s verstuurt de zendszijde een synchronisatiepatroon, SYNC. De ontvangtzijde kan hieruit afleiden waar het eerste pulspatroon begint en welk patroon bij een bepaald gesprek behoort. In elke cyclus is er ook een pulspatroon SIG voor interne communicatie van het telefoonnet. De rest van de cyclus is verdeeld over de dertig gesprekken (afb. I-2). De cyclustijd van 125 μ s is daarom verdeeld over 32 gelijke 'tijdssleuven' van 3,9 μ s. De puls-frequentie is dan $32 \times 64 \text{ kbit s}^{-1} = 2,048 \text{ Mbit s}^{-1}$. Door stapeling van deze systemen kan men tot meer dan dertigduizend gesprekken in één glasvezel vervoeren.



I-1

INTERMEZZO I



I-1. Door deze glasvezelkabels, slechts 0,1 millimeter dik, kunnen per seconde 2,5 miljard bits worden gejaagd. Dit is net zoveel informatie als een grote encyclopedie bevat. De honderdduizend ton koper in het Nederlandse telefoonnet kan worden vervangen door nog geen achthonderd ton kwartsglas.

I-2. Bij pulscodemodulatie wordt een spraaksignaal 8000 keer per seconde bemonsterd (a). Na omzetten van de bemonsteringspulsen in code en overseinen daarvan, wordt de code

weer omgezet in pulsen (c). Hierbij ontstaat met behulp van een laagdoorlaatfilter een spraaksignaal (d) dat lijkt op het oorspronkelijke. De monsterfrequentie belooft het versturen van hoge tonen.

I-3. Na stapelen van gesprekken, bestaat het signaal dat een centrale verzendt iedere 125 μs uit dertig tijdsleuven van 3,9 μs en twee coderingspatronen, SYNC en SIG. Zo'n tijdsleuf bevat in een code van 8 bit de momentele waarde van het signaal van één gesprek.

men de kiesschijven op de telefoontoestellen door druktoetsen. Bij kiesschijven zorgt het openen en sluiten van een contactje tijdens het terugdraaien van de schijf, voor de stroompulsen die in de centrale het doorschakelen sturen. Het systeem in een druktoets toestel past voor signalering een tooncode toe. Bij het indrukken van een toets zendt het toestel met behulp van enkele toongeneratoren twee verschillende tonen naar de centrale (afb. 6). In de centrale worden de tonen omgezet in kiesopdrachten. Het aantal fouten ('verkeerd verbonden') daalt aanmerkelijk en de kiessnelheid is nu ongeveer twee maal zo groot.

Elektronica

De elektronica heeft voor het telefoonnet veel meer betekend dan een goede manier van versterken. Vanaf 1925 kwamen ook radioverbindingen ter beschikking van de telefonie. Tevens bood elektronica voor de draadgebonden transmissie de mogelijkheid om meer dan tienduizend gesprekken gelijktijdig over één lijn te laten lopen. Net zoals bij radiostations, die verschillende frequentiebanden gebruiken, storen zij elkaar niet. Tenslotte verschaft de elektronica de middelen om snel te kunnen schakelen. Dat veroorzaakte niet alleen een omwenteling in de schakeltechniek voor computers en telefooncentrales, maar leidde ook tot de ontwikkeling van de digitale transmissietechniek, waar we later op terug zullen komen.

Radioverbindingen

Radioverbindingen kunnen in het telefoonnet op meer manieren worden toegepast. Bij de *kortegolfverbindingen* zorgen radiogolven met een golflengte van tien tot honderddertig meter voor het overbrengen van een signaal. Deze golven weerkaatsen tegen de ionosfeer, een laag met veel geïoniseerde deeltjes die zich hoog in de atmosfeer bevindt. Door herhaald terugkaatsen tussen ionosfeer en aarde kunnen deze golven, die zich net als het licht langs een rechte lijn voortplanten, de verste uithoeken van de aarde bereiken. Alleen dicht bij de zender is er een stiltezone. Deze radiogolven zijn vooral geschikt voor transoceanische verbindingen en verbindingen met schepen.

Voor verbindingen over enige kilometers afstand dienen *straalverbindingen*. Hierbij is

sprake van een directe signaaloverdracht zonder reflecties tussen zender en ontvanger. Door de hoge frequenties kan de zendenergie met een schotelantenne tot een straal worden gebundeld. Voor verbindingen over langere afstanden zijn, vanwege de kromming van de aarde, zend- en ontvangstations op bergen of torens nodig. Net als bij de draadgebonden transmissie, kunnen straalverbindingen een groot aantal gesprekken tegelijk verzenden.

Sinds 1970 neemt het gebruik van kortegolfverbindingen voor transoceanische telefoongesprekken sterk af door het gebruik van zeekabels met ingebouwde versterkers en het beschikbaar komen van geostationaire satellieten, die op een hoogte van 36 000 km schijnbaar stil boven de evenaar staan. Deze satellieten fungeren als tussenstations voor een straalverbinding over zeer grote afstand.

Mobiele telefoons

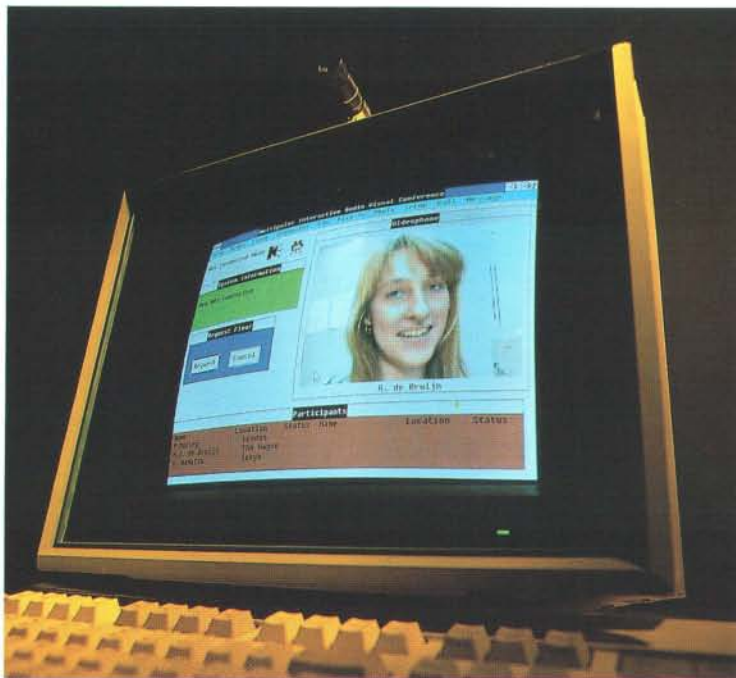
De radioweg wordt ook steeds meer gebruikt voor de autotelefoon, die van de automobilist een volwaardige abonnee van het automatische telefoonnet kan maken. Hoewel het gebruik



8

8. Deze schotelantennes zorgen voor vele telefoonverbindingen met de andere kant van de oceaan.

9. Onderzoekers proberen de informatiehoeveelheid te vergroten die tegelijkertijd kan worden overgebracht. Dit houdt de belofte in van beeldtelefoon en een betere geluidskwaliteit. Naar verwachting kunnen particulieren vanaf 1995 de pan-Europese beeldtelefoon gaan gebruiken.



9



10. In Duitsland testen onderzoekers inmiddels een klein antennenet dat geschikt is voor de Personal Telephone. Het bereik is nog beperkt; je moet je hooguit tweehonderd meter vanaf een antenne bevinden.



10

van satellieten voor autotelefonie in principe wel tot de mogelijkheden behoort, gebruikt men hier toch een dicht net van zend- en ontvangststations dat een onderdeel van het telefoonnet vormt. Het toestel in het voertuig stemt automatisch af op het sterkste station. Als de ontvangst van dat station tijdens de verplaatsing van het voertuig te zwak wordt, zoekt het toestel het station dat dan het sterkste signaal geeft en meldt zich daar. In de databanken van het telefoonnet wordt automatisch bijgehouden waar een voertuig zich bevindt, zodat de inkomende oproepen naar het juiste station kunnen worden gestuurd.

Een recente toepassing van radioverbindingen is de draadloze telefoon, waarmee men zich enkele honderden meters van het vaste toestel kan verwijderen. De telefoonhoorn is daarbij met druktoetsen en zoemer uitgebreid tot een volwaardig mobiel toestel. Men is daardoor altijd bereikbaar terwijl men zich vrij beweegt over een fabrieksterrein of een congreshal. De draadloze telefoon viert daarom ook hoogtij op de effectenbeurs van Wallstreet.

Binnen enkele jaren kunnen we een mengvorm van de autotelefoon en de draadloze telefoon verwachten. Als er straks een Europees digitaal autotelefoonnet is, zal de abonnee ook met een compacte *Personal Telephone* van dit net gebruik kunnen maken. Door de verregaande verkleining van onderdelen, hoeft zo'n apparaat niet groter te zijn dan een telefoonhoorn. Uitgerust met oplaadbare accu's, is het mogelijk gesprekken te voeren in de trein of op de fiets. Het net van zend- en ontvangststations zorgt voor de juiste verbinding.

Digitale transmissie

Bij digitale transmissie wordt spraak door middel van *Puls Code Modulatie* omgezet in een bitsstroom van 64 kbit s^{-1} (zie Intermezzo 1). Deze omzetting gebeurt in de lokale centrale waar het signaal van de abonnee binnenkomt. Het digitale signaal gaat daarna via het telefoonnet naar de lokale centrale van bestemming, waar het wordt terugvertaald naar een wisselstroom analoog aan de spraak. Dat kan aan de andere zijde van de wereld zijn. Ondanks de duizenden kilometers kabel of radio-weg en de honderden versterkers in de verbinding, treedt bij de digitale techniek geen kwaliteitsverlies op. Het pulspatroon kan namelijk zo vaak als nodig volledig worden geregeneerd, waarbij het onderscheid tussen de digitale nullen en enen niet vervaagt. Dit staat in scherpe tegenstelling tot de oudere, analoge techniek. Daarin levert elk stoorsignaal een niet te herstellen bijdrage aan de ruis. De techniek voor telefooncentrales en transmissie zijn nu beiden gebaseerd op de elektronische schakeltechniek. Dit opent de mogelijkheid voor de verregaande techniekintegratie IST (*Integrated Switching Transmission*), die tot grote besparingen leidt (Intermezzo II).

Bij de thans onder aandrang van de Europese Gemeenschap in ontwikkeling zijnde systemen ISDN (*Integrated Services Digital Network*) en IBCN (*Integrated Broadband Communication Network*) zullen de digitale lijnen worden doorgetrokken tot aan de abonnee. Dit maakt integratie van de bestaande diensten mogelijk. Ook ontstaat er zo een ongekend aantal nieuwe diensten waarvoor snelle datacommunicatie en bewegende beelden nodig zijn. De abonnee zal dan ook de kabeltelevisie uit het geïntegreerde telecommunicatienet

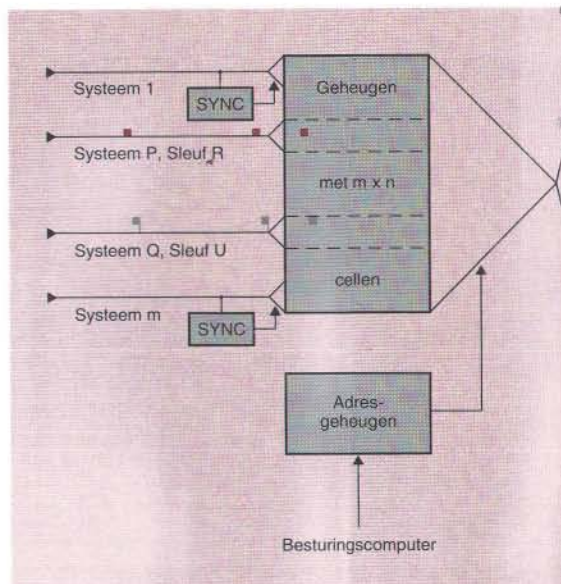
Geïntegreerde schakel- en transmissietechniek (ST)

Als een PCM-systeem met dertig gesprekken binnenkomt in een centrale, moeten de pulsstromen die bij die gesprekken horen naar de juiste uitgang worden gestuurd. De introductie van elektronische schakeltechniek in transmissiesystemen en centrales maakt het schakelen van de pulsstroom mogelijk. Het pulspatroon van 8 bit dat bij een bepaald gesprek behoort, wordt daartoe bij binnenkomst opgeslagen in een voor dat gesprek gereserveerde cel van een elektronisch geheugen. Op het juiste moment, als in de cyclus signalen van dit gesprek aan de beurt zijn voor doorzenden, wordt dit pulspatroon vervolgens op het gewenste uitgaande PCM-systeem geplaatst.

Een voorbeeld van zo'n systeem is de type-T-kiestrap. Afbeelding II-1 laat zien hoe in totaal m PCM-systemen met ieder n gestapelde gesprekken uitkomen op de kiestrap T. Deze bevat een elektronisch geheugen met $m \times n$ cellen van 8 bits. Met behulp van het synchronisatiepatroon SYNC is het mogelijk elk binnenkomend patroon van 8 bit op te slaan in de cel die is bestemd voor dit patroon of gesprek. Het is nu dus nodig om de cyclustijd van $125 \mu s$ te verdelen over $m \times n$ tijdsleuven. Iedere $125 \mu s$ (afgeleid van 8 kHz) wordt het volgende patroon over de geheugeninhoud van de cel geschreven.

Een adresgeheugen loopt in de cyclus mee en houdt bij welk deel van het geheugen hoort bij een bepaald deel van de cyclus, ofwel een gesprek. De besturingscomputer van de telefooncentrale leest de inhoud van een adresgeheugen. Met behulp hiervan bepaalt de kiestrap op welk tijdstip en naar welk PCM-systeem het elke celinhoud moet wegzenden. Dit heet *schakelen in het tijdsdomein*, en de kiestrap noemen we een T-trap.

Omdat elk gesprek een transmissieweg in beide richtingen vereist, moet de kiestrap voor elk gesprek twee complementaire verbindingen opbouwen. Het patroon in sleuf R van binnenkomend systeem P moet bijvoorbeeld worden doorgeleid naar sleuf U



II-1

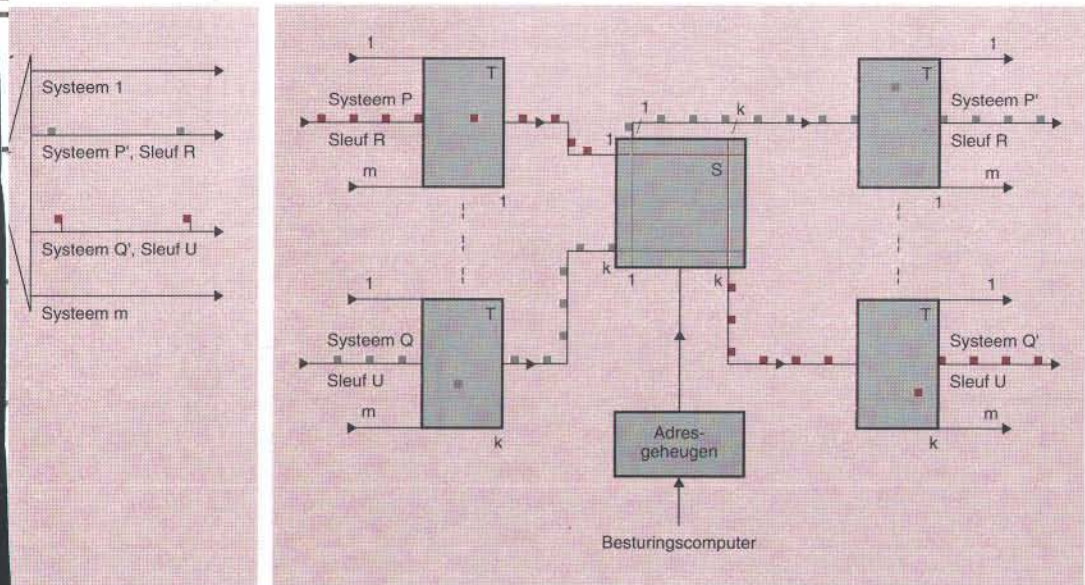
van uitgaand systeem Q' en in dezelfde cyclus moet het patroon in sleuf U van binnenkomend systeem Q worden doorgeleid naar sleuf R van uitgaand systeem P' (afb. II-1). Omdat er een praktische grens is aan de snelheid, is het nodig om het aantal PCM-systemen te beperken dat men op deze wijze kan hanteleren. Voor grotere centrales plaatst men daarom trappen achter elkaar. Meestal wordt de kiestrap van het type T afgewisseld met een trap van het type S (*space*), met k binnenkomende systemen en k uitgaande (afb. II-2).

Er is bij de type-S-kiestrap geen geheugen voor pulspatronen aanwezig. In elke tijdsleuf kan echter, onder besturing van een in de cyclustijd rondlopend

kunnen betrekken. Een arts bijvoorbeeld kan dan voor overleg een medische scan per telefoonlijn naar een collega sturen.

Bij de digitale transmissietechniek is het mogelijk een telefoonsignaal te versturen via glasvezels. Die vormen een zeer aantrekkelijk alternatief voor de koperen geleiders. Aan de zenzijde brengt een laser of lichtgevende diode het signaal in de vezel. Een lichtgevoelige diode kan aan de ontvangstzijde dit signaal weer aan

de vezel onttrekken. In principe treedt er geen verlies in signaalsterkte in het glas op. Daardoor kan de afstand tussen de signaalversterkers veel groter zijn. Bij koperen coaxiale geleiders (deze bestaan uit een buisvormige buitengeleider of mantel en een binnengeleider of kern, gescheiden van elkaar door isolatiemateriaal) en de gebruikelijke brede frequentieband bevinden die zich hooguit enkele kilometers uit elkaar bevinden. Bij signaaltransport via glas-



11-2

adresgeheugen, een pulspatroon worden overgebracht van een inkomend systeem naar een bepaald uitgaand systeem. Omdat er k inkomende systemen zijn, kunnen er in een tijdssleuf k pulspatronen worden overgebracht. Dit noemen we *schakelen in het ruimtelijke domein*. Het is voordelig om de PCM-systemen naar en van de S-trap een m maal hogere snelheid te geven dan die van de systemen tussen de centrales, om het aantal S-trappen tot een minimum te beperken. De inhoud van de adresgeheugens worden bepaald door de besturingscomputer van de centrale. In afbeelding II-2 is de doorgave van een gesprek in de gebruikelijke TST-configuratie weergegeven.

Il-1. Een type T-kiestrap slaat de inhoud van de tijdsleuven van binnenkomende systemen voor maximaal de cyclusduur (125 μ s) op in cellen van geheugen G. Voordat die tijd verstreken is, schuift de inhoud van zo'n cel door naar een sleuf van een uitgaand systeem. Het adresgeheugen A bepaalt de plaats van de cellen. De spraakmonsters verlaten in gewijzigde volgorde de kiestrap. Per gesprek zijn in het adresgeheugen twee verbindingsvastgelegd (voor de heen- en terugrichting).

Il-2. Een type S-kiestrap heeft geen geheugen, zodat hier de spraakmonsters in één tijdsleuf door schuiven van ingang naar uitgang, zoals vastgelegd in adresgeheugen. Door deze vereenvoudiging kan deze kiestrap sneller werken en kan het aantal sleuven van 125 μ s en het aantal in- en uitgangen worden uitgebreid. Omdat de tijds-aanpassing er belangrijk is wordt de S-trap met één of meer T-trappen gecombineerd. Deze T-S-T-configuratie toont twee verbindingsen voor één gesprek.

vezels kunnen de versterkers zich echter enkele honderden kilometers van elkaar bevinden. Lichtgevende en lichtgevoelige halfgeleiders zijn voorts het uitgangspunt voor een geheel nieuwe tak van de elektronica, de *opto-elektronica*, die zeer direct kan samenwerken met de glasvezels. Het telefoonnet is door nieuwe technologieën, nieuwe concepties en nieuwe diensten in een revolutionaire ontwikkelingsfase terechtgekomen.

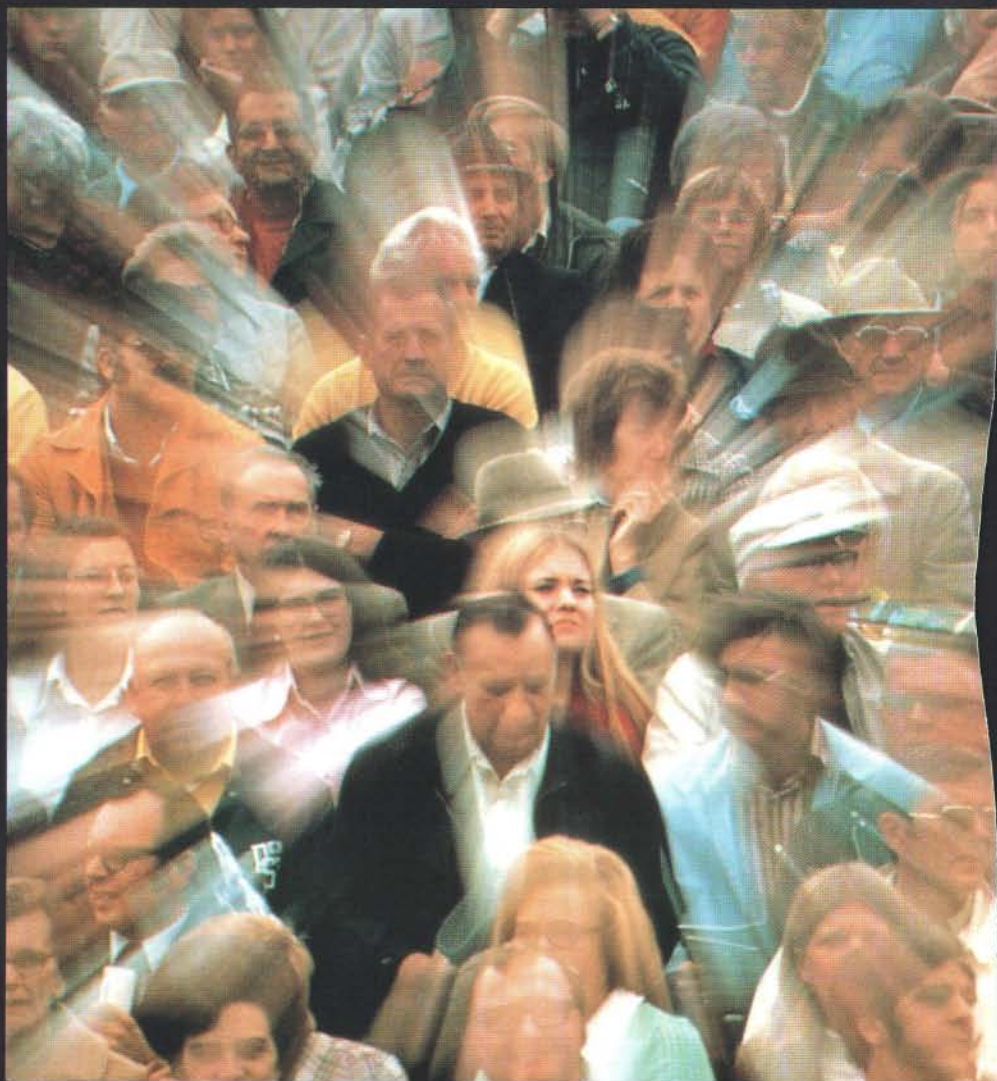
Bronvermelding illustraties

BASF, Ludwigshafen, D: pag. 648-649.
Siemens, Den Haag: 2, 3, 11, I-1.
NKF Kabel BV, Waddinxveen: 5.
AT&T, Hilversum: 8.
PTT Telecom, Den Haag: 9.
PTT Research, Dr Neher Laboratorium: 10.
De overige afbeeldingen zijn afkomstig van de auteur.

Literatuur

Pierce JR, Noll AM. Signals. The Science of telecommunications. New York: Scientific American Library, 1990. Van dit boek verschijnt in 1992 een Nederlandse vertaling bij Natuur & Techniek.

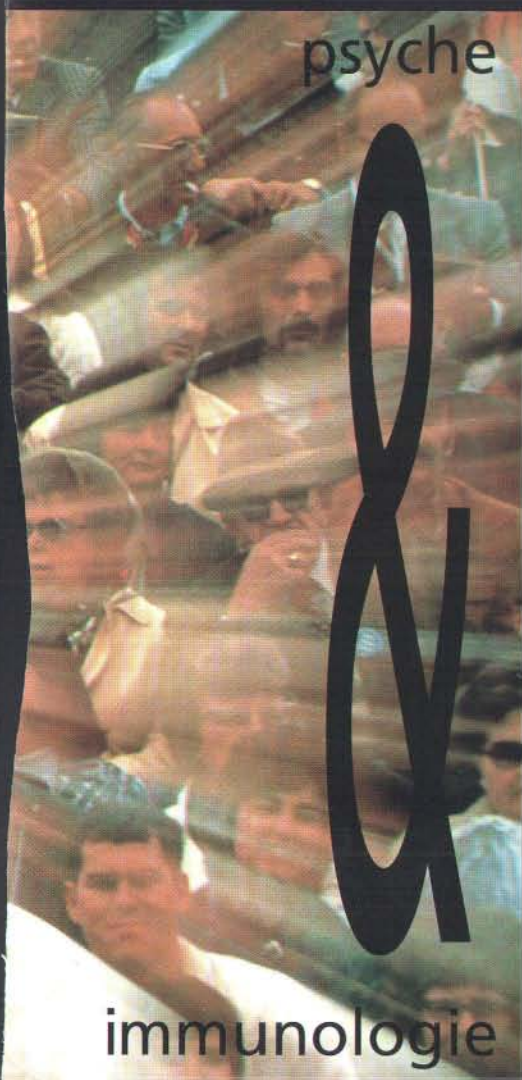
Mentale we



erstand

Frank Berkenbosch

*Laboratorium voor Farmacologie,
Vrije Universiteit, Amsterdam*



Ons geneeskundig onderzoek baseert zich vooral op de opvatting van Descartes dat lichaam en geest strikt zijn gescheiden. Maar de aandacht voor de biopsychologie, die dit dogma volslagen negeert, is groeiende. Niet alleen in Nederland en België, maar ook in de omringende landen en de Verenigde Staten valt de snelle groei van deze discipline op. Biopsychologen richten zich op de invloed van de geestesgesteldheid op allerlei lichaamsfuncties, waarbij vooral het afweersysteem veel interesse geniet. Dat is niet zo vreemd, aangezien dit systeem een cruciale rol speelt bij het tegengaan van allerlei infecties en kanker. Bestaat er een direct contact tussen de hersenen en het afweersysteem? En zo ja, hoe vindt dat contact dan plaats?



1

Bij sterfgevallen gaan de nabestaanden doorgaans vaker naar de huisarts en ze gebruiken gemiddeld meer alcohol en kalmerende middelen. Ook treffen we bij hen meer gevallen aan van kanker en hart- en vaatziekten. Hun lichamelijke afweer blijkt danig onderdrukt: ze hebben veel minder lymfocyten dan normaal en bovendien reageren deze slechter. Lymfocyten zijn bepaalde witte bloedcellen, die een belangrijke rol spelen bij het uitschakelen van bacteriën, virussen en andere indringers.

De invloed van de geest kan echter ook positief inwerken op de lichamelijke gesteldheid. Vrouwen met borstkanker leven gemiddeld langer wanneer ze wekelijks in groepstherapie gaan en alle aspecten van hun ziekte kunnen bespreken. Vrouwen die nog niet in therapie zijn, maar wel weten dat ze nog zullen worden geplaatst, bezitten duidelijk meer *natural-killer-cellen*. Natural-killercellen, ook wel NK-cellen genoemd, behoren net als de lymfocyten tot het afweersysteem en spelen een belangrijke rol bij het bestrijden van tumoren.

In deze gevallen had de geestesgesteldheid duidelijk invloed op de gezondheid. Maar vaak is het moeilijk om conclusies te trekken uit dergelijke gegevens. Want wanneer we de invloed van een stressfactor onderzoeken, moeten we de overige omstandigheden constant houden. Helaas zit ons Westerse levenspatroon vol met stressfactoren. Hierdoor kunnen we de resultaten van stressonderzoek bij mensen vaak op meerdere manieren verklaren.

Proefdieren

In experimenten met proefdieren kunnen we de invloed van één psychische stressfactor bestuderen. Als we een rat bijvoorbeeld in een te kleine ruimte plaatsen, zal het dier heftig schrikken en proberen te ontsnappen. Spuiten we het vervolgens in met een *antigeen* (een lichaamsvreemde stof die het afweersysteem stimuleert), dan vinden we enige dagen later meer *antistof* (de reactiestof van het afweersysteem op een antigeen) dan bij een dier dat niet in zijn bewegingsvrijheid is geremd. De stressprikkel zorgt hier dus voor een stimulering van het afweersysteem. Wanneer we het antigeen enkele uren na de stressprikkel toedienen, dan neemt de antistofvorming niet toe. De tijd tussen de stressprikkel en het toedienen van een antigeen is dus belangrijk voor de omvang van de afweerreactie.

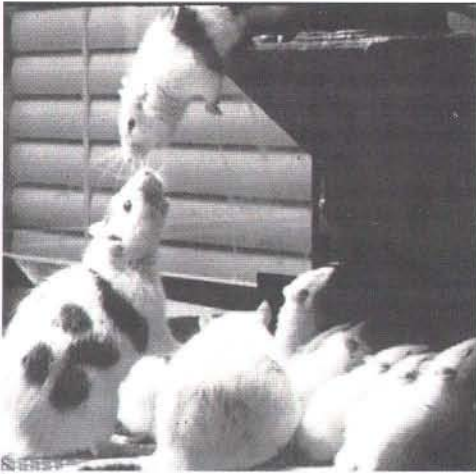
We kunnen ook meerdere factoren bestuderen, omdat ratten

1. Stressprikkel kunnen leiden tot het gereedmaken van verdedigingssystemen zoals dit agressieve gedrag. Zenuwen geven hormonen af die een dubbele rol in de stressreactie spelen: enerzijds activeren ze het lichaam en anderzijds stabiliseren ze de stressreactie.

2. Ratten leven in kolonies waarin de mannetjes hun plaats in de sociale rangorde bepalen door middel van gevechten. De positie die de mannetjes weten te veroveren, blijkt invloed te hebben op de reactiviteit van het afweersysteem.

Aangeboren

Barrières en 'veelvraatcellen'
Onder meer:
huid, maagzuur, traanvocht,
macrofagen



2

in groepen leven. In rattenkolonies heerst een strikte sociale rangorde, die door gevechten wordt bepaald. De winnaar ontwikkelt zich tot het dominante mannetje en neemt de leiderspositie in. De gevechten hebben een zeer grote invloed op het afweersysteem. Dit kunnen we zien aan de hand van de grootte van de thymus, het orgaan waar de rijping en ontwikkeling van een type afweercel plaatsvindt. Vergelijken met ratten die niet in groepsverband leven, is de

thymus bij 'groepsratten' sterk verschrompeld. Binnen deze laatste groep zijn er bovendien grote verschillen tussen dominante en ondergeschikte dieren. Het lijkt alsof we de sociale positie van een rat af kunnen lezen aan zijn afweersysteem. Het beheersen van een situatie of het gevoel die onder controle te hebben, is dus bij dieren een invloedrijke factor voor de wijze waarop het afweersysteem zal reageren.

Hormonale schakels

Voordat we verder gaan met de invloed van de psyche op het immuunsysteem, moeten we wat meer weten over de reactie van een organisme op een stressprikkel. Hoe komt zo'n reactie tot stand en wat gebeurt er precies?

Omgevingsprikkels komen via de zintuigen de hersenen binnen. Alle prikkels activeren het hersendeel dat zorgt voor verhoogde alertheid en voor het klaarmaken van de lichamelijke verdedigingssystemen. Kort daarop treedt er een tweede hersensysteem in werking. Daar vindt de evaluatie van de situatie plaats, waarbij in het geheugen wordt nagegaan of een vergelijkbare situatie al eens is voorgekomen. Aan de hand van de uitkomst van het evaluatieproces neemt de alertheid af of blijft ze voortduren.

Het gedrag dat bij de alertheid hoort, is agressief (vechten) of defensief (vluchten,

Afweersysteem

Verworven

Gespecialiseerde cellen, afkomstig uit of opgeslagen in onder meer: beenmerg, thymus, milt, lymfeknopen

B-lymfocyten

Produceren antistoffen

T-lymfocyten

Natural-killercellen

Doden afwijkende cellen zonder herkenning door antistoffen

Cytotoxische cellen

Doden afwijkende cellen na herkenning door antistoffen

T-helpercellen

Stimuleren het afweersysteem

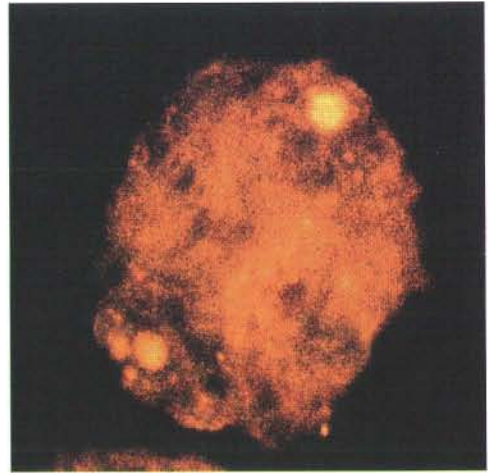
T-suppressorcellen

Onderdrukken het afweersysteem

3. Naast de aangeboren immuunbarrières weet ons lichaam in de loop van ons bestaan een steeds completer en aangepaster immuunstelsel te verkrijgen. We zien hier een overzicht met onder meer de diverse immuuncellen en hun globale werking.

schuilen). De neuronale basis van dergelijk gedrag vinden we in een gebied in de hersenen dat om de hersenstam ligt, het limbische systeem. Dit systeem reguleert ook de energievoorziening. De stofwisseling maakt de nodige energie vrij op commando van hormonen. Dit zijn stoffen die ergens in het lichaam geproduceerd worden, aan het bloed worden afgegeven en elders in het lichaam inwerken op hun doelwit. De hormonen die zorgen dat het lichaam energie vrijmaakt voor de alertheid, worden allereerst afgegeven door zenuwcellen. De reactie noemen we daarom neuro-hormonaal. Tegelijk vindt er een soort tegenbeweging plaats, zodat het lichaam het geheel in de hand kan houden.

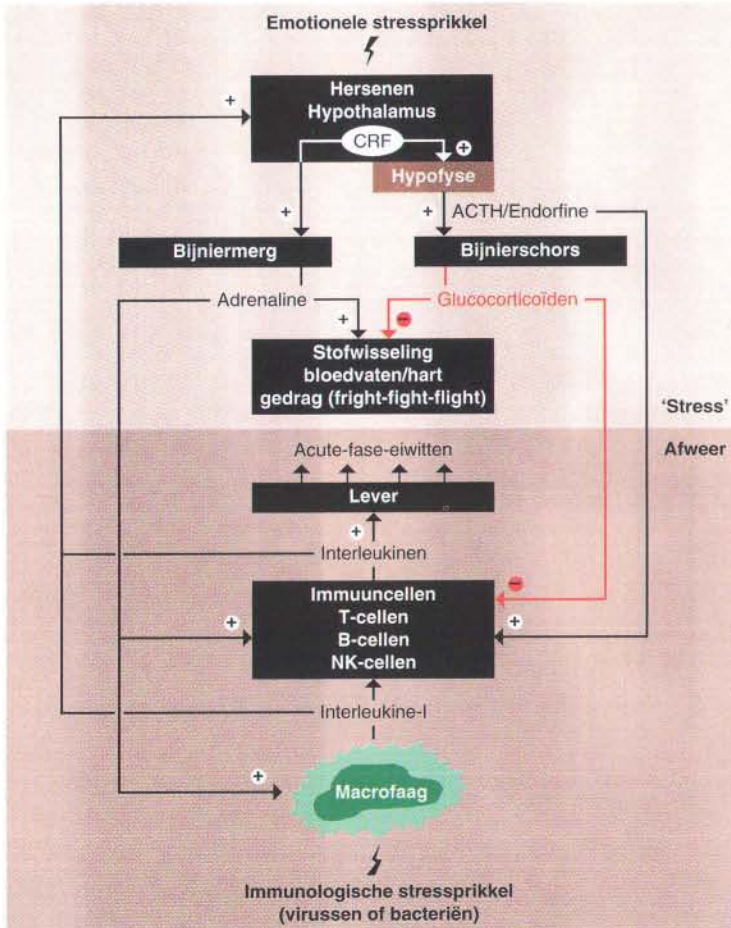
Onlangs is vastgesteld dat een klein eiwit een belangrijke rol speelt in de coördinatie van de

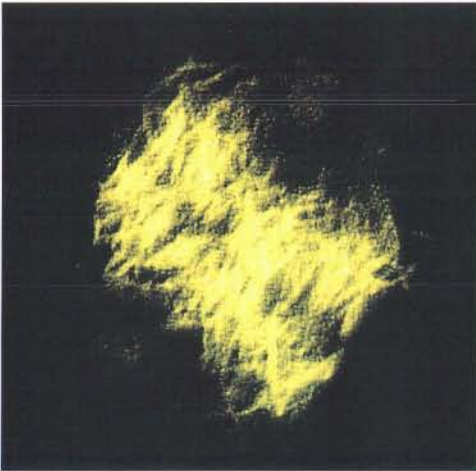


4a

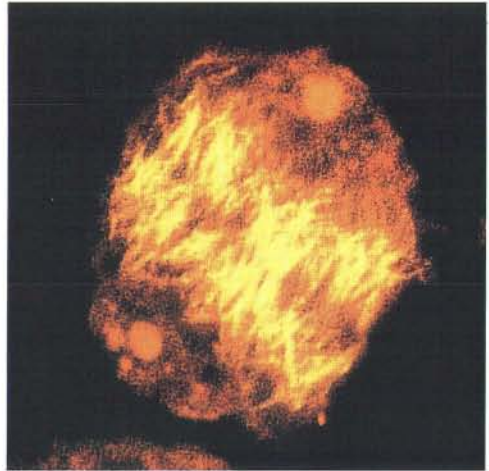
4. We kunnen antistoffen, de stoffen die het lichaam produceert bij contact met een vreemde stof, koppelen aan een fluorescerend molecuul en gebruiken om heel specifiek eiwitten zichtbaar te maken. Willen we bijvoorbeeld het eiwit tubuline bestuderen, dan kunnen we dat isoleren uit gist en inspuiten in een geit. Die zal dan anti-tubulines produceren. Deze dierlijke antistoffen kunnen we aan tubulines in plantecellen laten hechten. De plaatjes a, b en c zijn alledrie gemaakt met behulp van confocale fluorescentie-microscopie. In a zien we een protoplast (een cel zonder celwand) van de tabaksplant. De cel is zich net aan het delen. Er zijn al twee kernen te zien, maar de afscheiding tussen de twee dochtercellen moet zich nog vormen. In b zien we de fluorescerende tubulines en in c een combinatie van a en b.

5. De relatie tussen ons immuunsysteem en de reactie van ons lichaam op stressprikkels is zeer complex. In het schema zijn stimulerende verbindingen in zwart weergegeven en remmende in rood. We moeten ons wel bedenken dat dit schema bij lange na niet compleet is.





4b



4c

stressreactie. De onderzoekers noemden het de *corticotropin releasing factor*. De cellen in het limbisch systeem die de corticotropin releasing factor (CRF) produceren, 'sturen' uitlopers naar de hypofyse en naar gebieden in de hersenstam, die een rol spelen bij de regulatie van *autonome* functies (niet aan de wil onderworpen, zoals de ademhaling, de bloeddruk, de hartslag en de stofwisselingsprocessen).

CRF met dubbele werking

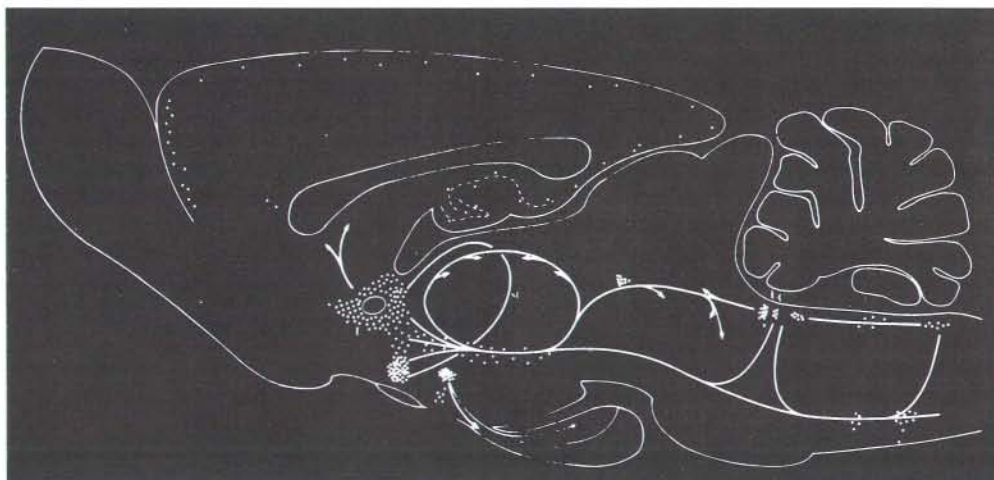
Enerzijds is de CRF betrokken bij het verhogen van de activiteit van het sympatisch zenuwstelsel (een deel van het autonome zenuwstelsel), doordat CRF indirect het bijniemerg aanzet tot de afgifte van adrenaline (afb. 5). Deze activering verloopt als een blikseminslag. Iedereen die wel eens is geschrokken, kent enkele onmiddellijke effecten, zoals alertheid en een verhoogde hartslag. Ook treden er minder merkbare veranderingen op: het lichaam stelt snel glucose beschikbaar aan spieren die alert moeten reageren en zorgt voor een andere verdeling van het bloed, door de vaten op de actieve punten te verwijderen en elders te vernauwen. Het lichaam wordt als het ware in één klap klaargemaakt voor actie (fright-flight-flight-reactie).

Anderzijds is CRF betrokken bij de tegenbeweging van de stressreactie, doordat ze de hypofyse en daardoor de bijnierschors activeert (zie afb. 5). De hypothalamus, een onderdeel

van het limbisch systeem, geeft CRF af aan het bloed en dat bereikt dan de hypofyse die vlak onder de hypothalamus ligt. De hypofyse wordt hierdoor aangezet om zelf ook hormonen af te geven, namelijk het *adrenocorticotroop hormoon* en het *endorfine*. Het adrenocorticotroop hormoon (ACTH) activeert de bijnierschors. Deze geeft dan op zijn beurt weer hormonen af, de *glucocorticoïden*. Waarschijnlijk zorgen deze bijnierschorschormonen voor de stabilisatie en het uiteindelijk stoppen van de stressreactie. De stressreactie kost het lichaam veel energie, en mag dus niet veel langer duren dan noodzakelijk is. Dit geldt eveneens voor het afweersysteem, zoals later zal blijken.

Hormonen en afweersysteem

We weten nu dus wat er zoal gebeurt tijdens een stressreactie. Waar ligt dan het verband met het immuunsysteem? Wel, het is gebleken dat enkele van bovengenoemde hormonen ook effect kunnen hebben op het afweersysteem (afb. 5). Ten eerste kan adrenaline, dat het bijniemerg afgeeft onder invloed van de CRF, zich binden aan receptoren op de cellen van het afweersysteem. Deze receptoren zijn eiwitmolekulen die verankerd liggen in de celmembraan. Als adrenaline aan zijn receptor bindt, activeert dat een enzym dat aan de receptor gekoppeld is. Het enzym zet de universele energiedrager ATP om in een verwant molecuul, het cyclisch-AMP. Een verhoogde cyclisch-AMP-concentratie in



6

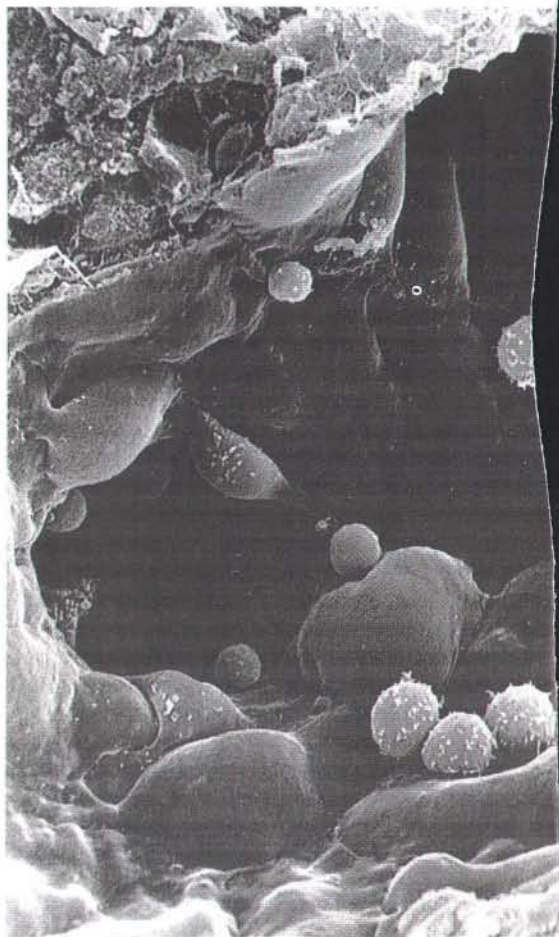
6. Een schematische doorsnede door de hersenen van een rat. CRF (punten)

7. Hier verlaten enkele lymfocyten de bloedbaan en treden een lymfeknoop binnen. Het lymfestelsel omvat vaten en klieren die de lymfevloei stof met de deeltjes die erin voorko-

men, afvoeren en filteren. Wanneer het lichaam bij de filtratie lichaamsvreemde verbindingen tegenkomt, vormt het antistoffen. Een deel van de lymfocyten dient als afweercel.

de cel activeert bepaalde enzymen. Deze zijn op hun beurt weer verantwoordelijk voor snelle biologische reacties zoals bijvoorbeeld het openen van ionkanalen in de celmembranen. Cellen die op deze manier door adrenaline geactiveerd zijn, zullen op een andere manier reageren wanneer ze een antigeen tegenkomen. Het heeft er alle schijn van dat adrenaline zo het afweersysteem stimuleert. Hetzelfde geldt voor het endorfine dat de hypofyse afgeeft. Ook daarvoor zijn receptoren in de membraan van witte bloedcellen gevonden.

De glucocorticoïden die door de bijnierschors zijn afgegeven, onderdrukken de activiteit van het afweersysteem, in tegenstelling tot adrenaline. Zij kunnen, afhankelijk van de concentratie in het bloed, verschillende effecten uitoefenen. Langdurige verhoging van de concentratie glucocorticoïden in het bloed zorgt voor de afbraak van witte bloedcellen en voor verandering van hun verdeling over de lymfoïde organen. Ook blokkeren glucocorticoïden



7

de synthese van *interleukinen*, een groep stoffen die door witte bloedcellen wordt geproduceerd. Interleukinen hebben onder meer een stimulerend effect op de hypothalamus en zodoende op de productie van de glucocorticoiden: een mooi voorbeeld van een *feed-back*-reactie (zie afb. 5).

De effecten van hormonen als de glucocorticoiden op het afweersysteem, komen veel trager tot stand dan die van hormonen als adrenaline en endorfine. Dat komt omdat de interactie tussen het hormoon en zijn receptor heel anders is. Receptoren voor de glucocorticoiden zitten namelijk niet gebonden aan de celmembranen, maar komen vrij in het cytoplasma van de doelwitcel voor. De binding van het hormoon aan de receptor leidt tot de vorming van

een hormoon-receptorcomplex. Dergelijke complexen verplaatsen zich van het cytoplasma naar de kern van de cel, en binden zich daar aan het erfelijke materiaal. Ze bevorderen of remmen het aflezen van bepaalde genen. Zo werkt ook de blokkerende werking van de glucocorticoiden op de interleukineproductie. De receptoren zijn namelijk onder andere aanwezig in de cellen die interleukinen produceren. Daar zorgt de binding van het receptorcomplex aan het genoom voor een remming van de interleukine-aanmaak.

Neuronale schakels

Pas een paar jaar geleden ontdekte men dat het afweersysteem niet alleen door hormonen in de



8

8. We spreken van 'coping' wanneer iemand het gevoel heeft een situatie onder controle te hebben. Coping heeft duidelijk een positieve invloed op de activiteit van het afweersysteem. Gespreksgroepen, zoals hier met jeugdige Cara-patiënten, kunnen het gevoel van coping bevorderen.

bloedbaan, maar ook direct door het centraal zenuwstelsel kan worden beïnvloed. Organen die tot het lymfestelsel behoren zoals de milt, de lymfeknopen en andere lokale afweerorganen (huid, longen, darmen) staan via zenuwen rechtstreeks met de hersenen en het ruggemerg in verbinding. Deze verbinding maakt een snelle en lokale reactie van dat systeem op veranderingen in de hersenen mogelijk. Zo lopen er zenuwvezels naar lymfoïde orgaantjes in de darmwand en die geven daar het *vasoactive intestinal peptide* af. Als dit eiwit zich bindt aan de

receptoren in de membraan van witte bloedcellen, zullen deze cellen niet meer zo makkelijk naar de darm terugkeren. Er ontstaat dan een andere verdeling van afweercellen in de darm, waardoor het reactievermogen van dit afweersysteem danig zal veranderen. Voor het afweersysteem in de huid en de longen zijn vergelijkbare mechanismen gevonden.

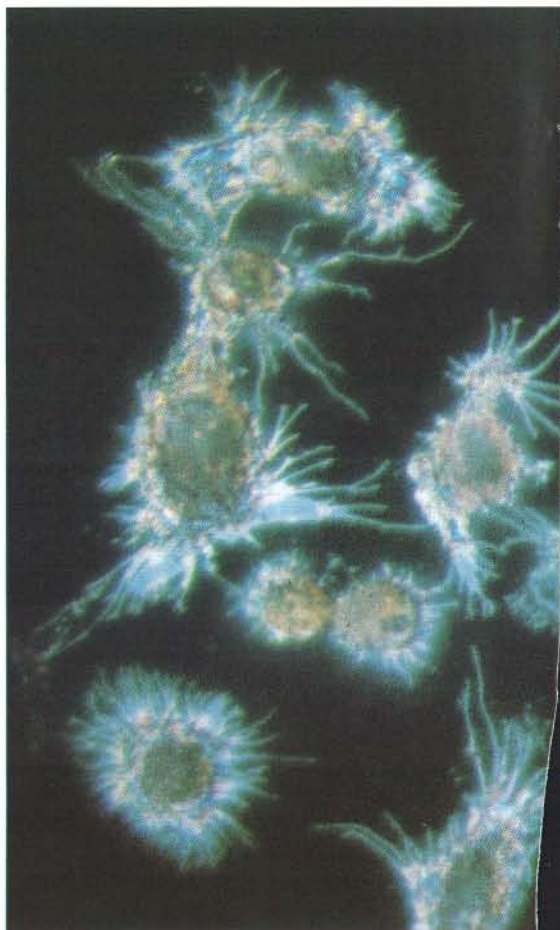
Zenuwverbindingen zijn dus van belang in de regulatie van de lokale afweer. Het volgende voorbeeld illustreert dit. Wanneer we ratten een lichaamsvreemde stof (*antigeen*) toedienen via de luchtpijp, vormen ze nauwelijks antistofvormende cellen in de nabijgelegen lymfeknoten. Deze afweerreactie treedt echter wel op wanneer we de ratten eerst een stressprikkel toedienen en dan pas het antigeen. Er moeten

9. Sommige micro-organismen of virussen die door onze afweerbarrière heendringen, kunnen zich gaan bemoeien met ons DNA. Ze kunnen bijvoorbeeld hun erfelijk materiaal tussen dat van ons stoppen en ons dan dwingen dat

stukje extra vaak te kopiëren. Of, zoals bij de plant op de foto, kunnen ze cellen aanzetten tot woekergroei waardoor zich tumoren vormen. Bovendien kunnen ze hen dan ook nog eens speciale voedingsstoffen laten produceren!



9

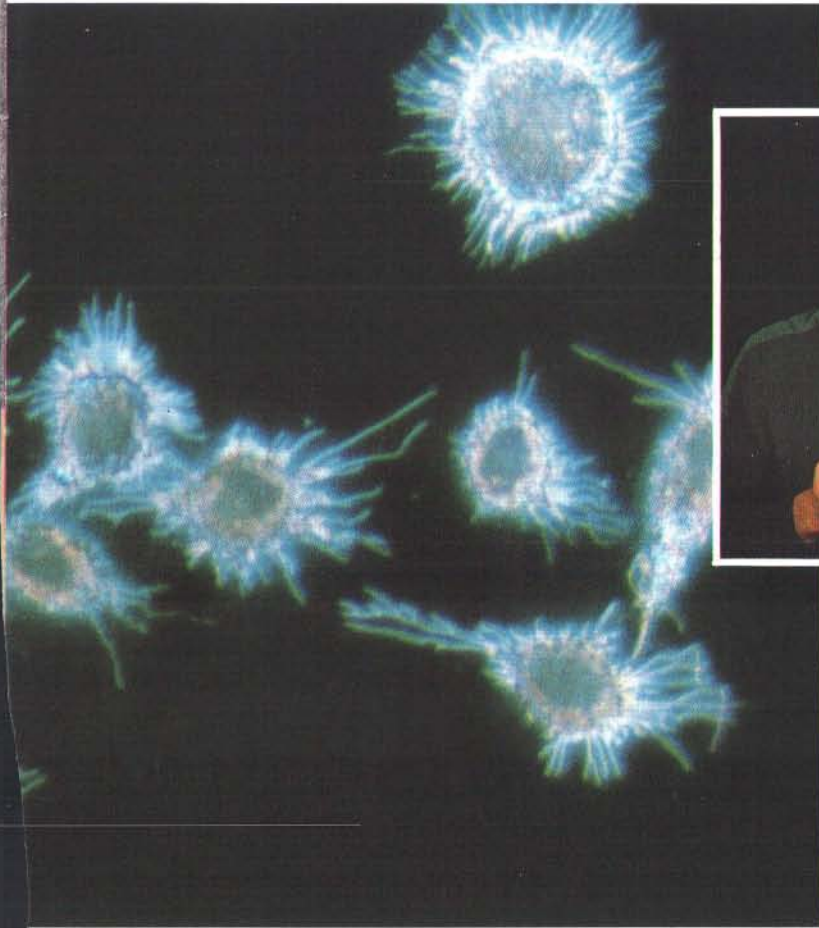


10

wel zenuwvezels bij betrokken zijn, want wanneer we de zenuw naar de longen doorsnijden, zien we géén toename van de lymfe-activiteit.

Het afweersysteem en gedrag

Een heftige afweerreactie gaat gepaard met veel veranderingen in ons lichaam. We hebben geen trek, we gaan vroeg naar bed, we hebben een algemeen gevoel van malaise en we zijn snel geïrriteerd of juist een klein beetje euforisch. Het duurde lang voordat onderzoekers zich vragen gingen stellen over deze gedragsveranderingen. Pas in de tweede helft van de jaren zeventig kwam het onderzoek naar de samenwerking tussen het afweersysteem en de hersenen goed op gang. Een hele eenvoudige



11

10. Macrofagen zijn de 'lomp' killers van ons immuunsysteem. Ze vreten alle vreemde cellen op die hen voor de uitlopers komen. De zogenaamde reflexie-contrastmicroscopie zorgt ervoor dat ook de uitlopers goed zichtbaar zijn.

11. We kennen allemaal wel de kenmerken van een flinke griep. Ook het toedienen van interleukinen kan dit ziektebeeld veroorzaken.

waarneming baande de weg daartoe: ratten die met antigeen waren ingespoten, produceerden steeds meer ACTH en bijnierschors hormonen naarmate de concentratie van antistoffen in het bloed toenam.

De onderzoekers stelden vast dat het afweersysteem tijdens de vorming van antistoffen ook 'boodschappers' maakt. Deze zorgen ervoor dat de hormonale reactie tot stand komt. Interleukine-1 is er één van. Het bevordert de aanmaak van witte bloedcellen als wapen tegen binnendringende bacteriën en virussen. Tegelijkertijd verhoogt interleukine-1 de activiteit van de hypothalamus waardoor er uiteindelijk meer ACTH en bijnierschors hormoon wordt afgegeven. Zoals we eerder hebben besproken, *remmen* bijnierschors hormonen op hun beurt

de activiteit van het afweersysteem, onder andere door de interleukine-1-afgifte aan het bloed te remmen. Net als bij de reactie op psychische prikkels, reageert het lichaam op een antigeen met een schijnbaar tegenstrijdige reactie: mobilisatie van 'energie' en 'strijdkrachten' (groei van witte bloedcellen onder invloed van interleukine-1), gevolgd door een tegenbeweging: verhoging van de concentratie bijnierschors hormonen door interleukine-1 om een te krachtige reactie van het afweersysteem in de hand te houden.

Inmiddels is vastgesteld dat interleukine-1 samen met andere interleukinen (zie Intermezzo) tal van andere functionele en biochemische veranderingen oproept in de hersenen. Dat uit zich bijvoorbeeld in een veranderde elektrische

activiteit van de hersenen (ritmen die kenmerkend zijn voor slaap), verhoogde activiteit van bepaalde zenuwcellen die adrenaline maken of in een veranderde dichtheid van receptoren voor de endorfinen, stoffen die zijn betrokken bij pijnstilling. Dat deze veranderingen zich op complexe wijze laten vertalen in ons gedrag en psychisch functioneren behoeft niet veel nadere uitleg.

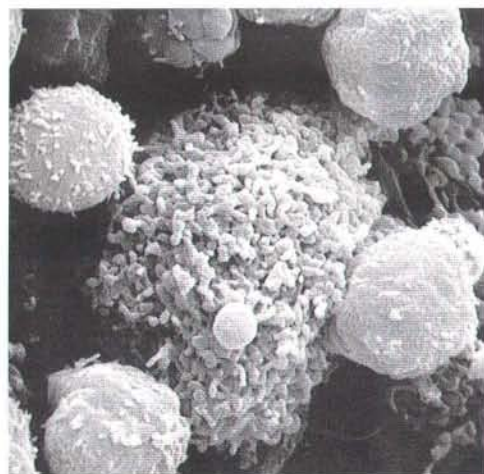
Stress als ziekmaker

Kan chronische stress tot ziekte leiden? Als we het over hart- en vaatziekten of maag- en darmklachten hebben, lopen de meningen uiteen. Vanuit immunologisch standpunt gezien, moeten we echter een duidelijk 'nee' verkopen. We meten onder bepaalde condities bij mensen en proefdieren wel een verminderde weerstand, maar dat kunnen we niet als de oorzaak van een ziekte aangeven. Wel zullen mensen eerder ziek worden bij blootstelling aan virussen of bacteriën wanneer het afweersysteem minder goed functioneert door stress. Stress kunnen we dus als *co-factor* aanmerken bij het ontstaan van infectieziekten, maar niet als de primaire oorzaak daarvan.

Alsof het leggen van verbanden tussen stress, het functioneren van het afweersysteem

12. Met verschillende vormen van microscopie zien we een macrofaag telkens anders. Deze scanning-

elektronenmicroscopische foto toont een grote macrofaag in het gezelschap van wat kleinere lymfocyten.



12

670

Interleukinen

Het immunologisch onderzoek kwam vanaf de jaren zestig in een ware stroomversnelling terecht, toen men ontdekte dat informatieoverdracht tussen witte bloedcellen niet alleen plaatsvindt door direct contact tussen cellen, maar ook door middel van hormonen. Aanvankelijk was de nomenclatuur voor deze hormonen nogal chaotisch. Zo werd een stof, afkomstig van macrofagen, die noodzakelijk was voor de groei van witte bloedcellen, aangeduid met lymphocyte activating factor (LAF), mitogenic protein (MP), T-cell replacing factor (TRF), B-cell activating



1-1

factor (BAF) en B-cell differentiation factor (BDF). In 1979 kwam daar de term interleukine bij. Deze benadrukt dat de stoffen boodschappers zijn tussen witte bloedcellen. Inmiddels zijn er ongeveer twaalf interleukinen bekend. De industrie produceert ze allemaal met behulp van recombinant-DNA-technieken (zie afb. 1-2). De meeste interleukinen zijn betrokken bij de bloedcelvorming. Enkele spelen een rol bij het tot stand komen van een gedegen afweerreactie. Het interleukine-1 bijvoorbeeld zet T-cellen aan tot de productie van interleukine-2 en interleukine-2-receptoren. Dit is nodig om de T-cellen versneld te laten delen en ze zo te laten reageren op het antigeen. Interleukine-1 zet ook de steuncel-

en ziek worden al niet moeilijk genoeg is, kennen we nog een bijkomend probleem. Hoe groot is de capaciteit van het afweersysteem? Hoeveel van ons potentieel aan 'killers' en aanverwanten hebben we nodig om indringers het hoofd te bieden? Het complexe gebied van de besproken wisselwerkingen levert de onderzoekers nog steeds hun dagelijkse portie stress op!

len en de cellen die de bloedvaatwanden bekleden, aan tot de productie van interleukine-6. Interleukine-6 is betrokken bij de afgifte door de lever van eiwitten die helpen bij ontstekingsreacties, de zogenaamde *acute-fase-eiwitten*. Ook de synthese van de tumor-necrosis-factor (heeft haar oorspronkelijke naam behouden) met haar dodelijke werking op kankercellen, wordt door interleukine-1 bevorderd.

Vanwege hun stimulerend effect op het afweersysteem worden de interleukinen ook toegepast in de strijd tegen kanker. Interleukinen hebben echter wel

bijwerkingen. In feite krijgt de patiënt na injectie het volledige ziektebeeld van een zeer zware griep. We weten nog niet op welke wijze deze effecten tot stand komen. Inmiddels is wel aangetoond dat in de hersenen receptoren voor het interleukine-1 voorkomen. Bovendien wordt interleukine-1 ook in het centrale zenuwstelsel gevormd. Ook is vastgesteld dat dit interleukine niet alleen een signaalfunctie heeft, maar ook is betrokken bij de embryonale ontwikkeling van hersenweefsel. Dit benadrukt nogmaals de innige samenhang tussen het afweersysteem en de hersenen.



I-2

I-1. Na de nodige opzuiveringsstappen hebben we genoeg zuiver interleukine in handen om uitgebreid onderzoek te doen naar bijvoorbeeld de toepassing van interleukinen als geneesmiddel.

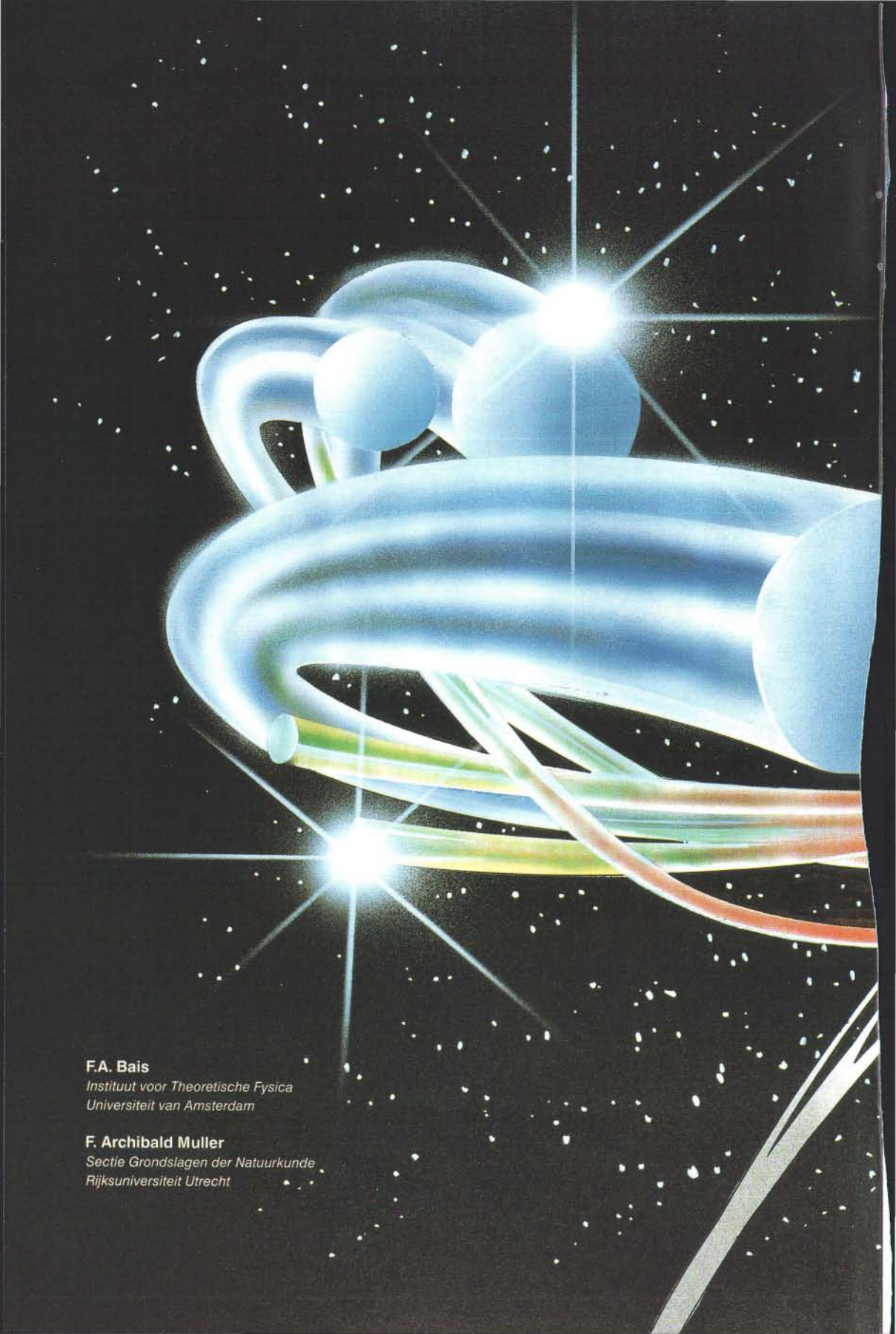
I-2. De meeste interleukinen die ons lichaam produceert, kan de industrie inmiddels ook maken. Of liever gezegd, laten maken. Werken met recombinant-DNA-technieken betekent immers dat we micro-organismen het zware productiewerk laten opknappen.

Bronvermelding illustraties

ZEFA, Düsseldorf, D: pag. 660-661
 Drs H. Dijkstra, Vrije Universiteit, Amsterdam: 1, 2
 Prof dr W. van Ewijk, Erasmus Universiteit Rotterdam: pag. 661, 7, 12
 Drs H. Kengen, Katholieke Universiteit Nijmegen: 4a, b, c
 Bob Bronshoff/Hollandse Hoogte, Amsterdam: 8
 Prof M. van Montagu, Laboratorium voor Genetica, Gent: 9
 Prof dr J.S. Ploem, Rijksuniversiteit Leiden: 10
 Hans van den Bogaard/Hollandse Hoogte, Amsterdam: 11
 Gist-Brocades, Delft: I-1, I-2
 De overige afbeeldingen zijn afkomstig van de auteur.

Literatuur

Tweel JG van den. Immunologie - Het menselijk afweersysteem. Maastricht: Natuur & Techniek, Wetenschappelijke Bibliotheek, 1988.
 Wiepkema PR, e.a. Stress. Leiden: Cahiers Bio-Wetenschappen en Maatschappij, juli 1990.
 Bekkum DW van, e.a. Nieuwe hormonen - Cellen en Cytokines. Leiden: Cahiers Bio-Wetenschappen en Maatschappij, april 1991.
 Berkenbosch F. Er is wel degelijk wisselwerking tussen het immuunsysteem en de hersenen. Biovisie Magazine 1989; 5/6, 39-43.



F.A. Bais

*Instituut voor Theoretische Fysica
Universiteit van Amsterdam*

F. Archibald Muller

*Sectie Grondslagen der Natuurkunde
Rijksuniversiteit Utrecht*



SUPER snaren

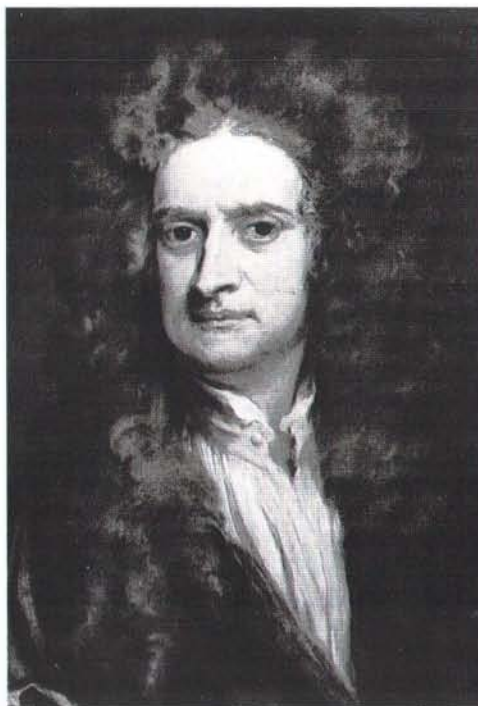
Sinds Einstein zoeken natuurkundigen naar een theorie die alle in de natuur voorkomende wisselwerkingen van elementaire deeltjes omvat: een volledige Unificatietheorie. Deze speurtocht is de afgelopen jaren geculmineerd in supersnaren. Het uitgangspunt van supersnaartheorieën is dat alle bekende elementaire deeltjes waaruit het universum is opgebouwd, corresponderen met verschillende quantumtoestanden van een minuscule 'snaartje' met een lengte van ongeveer 10^{-32} mm. Door deze theorieën is er nu een totaal nieuwe kijk op elementaire deeltjes en hun quantummechanische beschrijving. In dit artikel betreden we een elementaire weg die ons een uitzicht geeft op een stormachtige ontwikkeling binnen de theoretische natuurkunde.

In de theorie van de minuscule supersnaren besteden theoretisch-natuurkundigen veel aandacht aan de rol die supersnaren in de eerste 10^{-40} seconde na de Oerknal hebben gespeeld. Volgens de theorie was er toen wellicht sprake van meer dan de ons bekende drie ruimtelijke dimensies en hadden de snaren een enorme energie. Scintillatievezels vormen een belangrijk bestanddeel van moderne apparatuur voor het onderzoek naar elementaire deeltjes. Die energieën waarbij meer informatie over supersnaren valt te verwachten, zal men voorlopig nog niet kunnen bereiken.

De Griekse filosoof Demokritos van Abdera, die leefde in de vijfde eeuw voor Christus, hield de wereld een universum voor dat in laatste instantie bestond uit ondeelbare materiedeeltjes die elkaar wederkerig beïnvloedden. Volgens de moderne natuurkunde is dat waar — het universum zou in laatste instantie nog steeds bestaan uit elementaire deeltjes die met elkaar wisselwerken — maar de opvattingen over de aard van dergelijke deeltjes en hun wisselwerking zijn in de loop van vijftientig eeuwen wel drastisch veranderd (afb. 2).

Graviton en foton

In het natuurkundig wereldbeeld zijn alle mogelijke manieren waarop materie andere materie kan beïnvloeden, van lucifers afstrijken tot kernfusie, van pianospelen tot vulkaanuitbarstingen, van koffie zetten tot chirurgisch bombarderen, van je hoofd stoten tot je geliefde strelen enzovoort, allemaal te herleiden tot slechts vier verschillende wisselwerkingen: gravitatie, elektromagnetisme, zwakke en sterke wisselwerking. Gravitatie (zwaartekracht) en elektromagnetisme (elektrische en magnetische krachten) zijn goede bekenden. We kunnen de gevolgen van hun werking direct waarnemen, zij geven de fysica van ons dagelijks leven gestalte. De zwaartekracht bindt ons, en de maan, aan de aarde, bindt de aarde aan de zon, de zon aan ons Melkwegstelsel en ons Melkwegstelsel aan een cluster van melkwegstelsels; gravitatie bepaalt de massaverdeling in het heelal. De elektromagnetische kracht is ervoor verantwoordelijk dat atomen kunnen bestaan

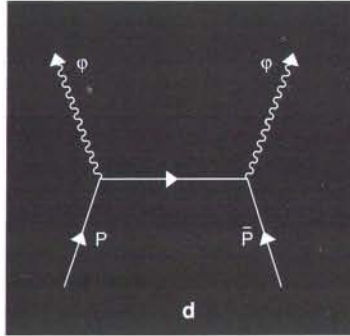
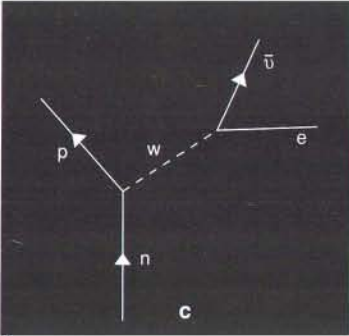
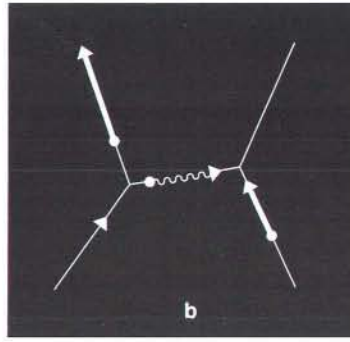
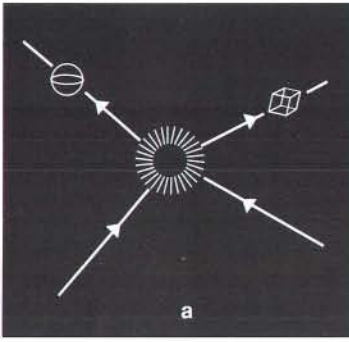


1

en dat zij zich kunnen samenvoegen tot moleculen. Daarmee zorgt deze kracht voor de enorme verscheidenheid aan stoffen die de wereld rijk is. Onze lichamen bijvoorbeeld zouden niet kunnen bestaan zonder elektromagnetisme. De elektromagnetische wisselwerking ligt ten grondslag aan de atoomfysica, de optica, de scheikunde, de biochemie, de biologie, de ge-

TABEL 1 De vier wisselwerkingen

Wisselwerking	Sterkte	Dracht (m)	Wisselwerkende deeltjes		Wisselwerkingsdeeltjes	
			Soort	Spin \hbar	Soort	Spin \hbar
Gravitatie	10^{-39}	∞	Alle deeltjes	$1/2$	Graviton	2
Elektromagnetisme	10^{-2}	∞	Alle geladen deeltjes	$1/2$	Fotonen	1
Zwakke wisselwerking	10^{-5}	10^{-15}	Quarks Leptonen	$1/2$	Intermediaire vectorbosonen	1
Sterke wisselwerking	1	10^{-15}	Quarks	$1/2$	Gluonen	1



2

1. Isaac Newton (1642 - 1727) publiceerde ruim driehonderd jaar geleden de *Principia*, waarin zijn bewegingswetten en de zwaartekrachtstheorie zijn vervat. Nog voor zijn dertigste had hij tevens de differentiaalrekening ontwikkeld en vastgesteld dat een prisma wit licht ontbindt in diverse kleuren.

2. Demokritus maakte zich al een voorstelling van de wisselwerking tussen botsende deeltjes (a). In de quantumveldentheorie bestaan er diverse wisselwerkingen. Twee deeltjes kunnen bijvoorbeeld een derde deeltje uitwisselen (b). In c zien we hoe een neutron vervalt in een proton en, via een W-deeltje, in een elektron en een anti-neutrino. Als een proton en een antiproton elkaar vernietigen, blijven er twee fotonen over.

neeskunde en het overgrote gedeelte van de techniek.

Elektrisch geladen deeltjes, zoals elektronen en protonen, werken op elkaar in door de uitwisseling van het ongeladen, massaloze *foton*. Alle deeltjes met energie en impuls trekken elkaar aan via gravitatie. Het wisselwerkingsdeeltje dat zij uitwisselen is het massaloze *graviton*. Met het gegeven dat het graviton en foton geen massa hebben, hangt samen dat zowel gravitatie als elektromagnetisme krachten zijn met een *lange dracht*: twee geladen deeltjes blijven een kracht op elkaar uitoefenen, hoe ver ze ook van elkaar zijn verwijderd; deze kracht wordt nooit exact nul. Gauss heeft bewezen dat de sterkte van alle lange-drachtkrachten afneemt met het kwadraat van de afstand. Dit is in overeenstemming met de universele gravitatiewet van Newton en met de wet van Coulomb.

Het verschil in sterkte tussen gravitatie en elektromagnetisme is echter zeer groot: een factor 10^{37} in het voordeel van het elektromagnetisme. Hoe zwak de zwaartekracht in feite is, kunnen we zien door ons een atoom voor te

stellen waarvan de elektronen aan de kern zijn gebonden door de zwaartekracht in plaats van door de elektromagnetische kracht. Een enkel waterstofatoom (een proton met een elektron dat daaromheen beweegt) zou dan groter zijn dan alle geschatte afmetingen van het heelal!

Sterke en zwakke wisselwerking

Een atoomkern bevat elektrisch positief geladen protonen. Omdat gelijke elektrische ladingen elkaar afstoten, rijst de vraag waarom een atoomkern niet onmiddellijk uiteenspat, of in natuurkundige termen, hoe de atoomkern een stabiel systeem kan vormen. Het antwoord luidt: omdat er over zeer korte afstanden (10^{-12} mm) een honderd keer sterkere, aantrekkende kracht werkt, die de elektromagnetische afstoting overwint. Deze kracht is de *sterke wisselwerking*. De atoomkern bevat ook nog eens de elektrisch ongeladen neutronen, die eveneens sterk wisselwerken en daardoor een soort kernkrachtlijm vormen. De sterke wisselwerking maakt derhalve het bestaan van atoomkernen mogelijk. De vrijkomende energie bij kernfusie

is afkomstig van de sterke wisselwerking; zonder de sterke wisselwerking zouden de zon en de sterren, die men kan opvatten als astronomische kernfusiereactoren, nimmer stralen. De *zwakke wisselwerking*, een factor 10^5 zwakker dan haar sterke zuster, speelt misschien de minst opvallende rol, namelijk die in het radioactieve *bèta*verval en in kernsplijting. Daarbij veranderen protonen in neutronen en omgekeerd. Zowel de zwakke als de sterke wisselwerking zijn krachten met een *korte dracht*; zij zijn alleen werkzaam over zeer korte afstanden, in de orde van 10^{-12} mm. Op grotere afstanden is van deze krachten niets te merken, daar is hun sterkte exponentieel klein.

Alle 'elementaire' materiedeeltjes zijn te verdelen in twee categorieën: *hadronen*, dat zijn deeltjes die zijn opgebouwd uit *quarks*, en *leptonen*, deeltjes die geen quarks bevatten. De bekendste hadronen zijn het proton en het neutron, die allebei zijn opgebouwd uit drie quarks. De bekendste leptonen zijn het elektron en het neutrino. Er zijn dus maar twee soorten materiedeeltjes die echt elementair zijn, dat wil zeggen dat ze niet verder opgebouwd zijn uit kleinere deeltjes, en dat zijn de quarks en de leptonen.

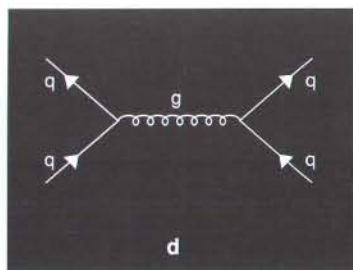
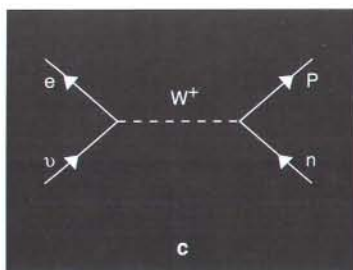
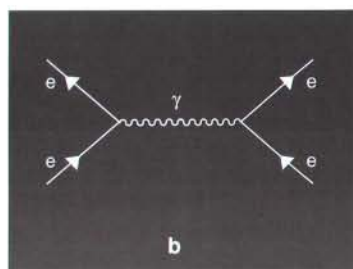
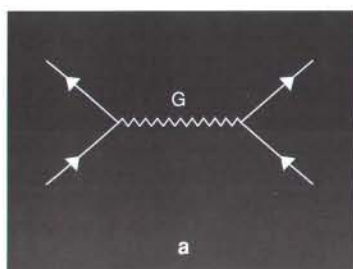
We hebben al gezien dat bij de zwaartekracht het graviton een rol speelt en bij de elektromagnetische kracht het foton. Ook bij de sterke en

de zwakke wisselwerking spelen deeltjes een rol. De sterke wisselwerking tussen quarks bestaat uit de uitwisseling van de *gluonen*. Bij de zwakke wisselwerking worden tussen de quarks de allesbehalve massalooze, maar betrekkelijk zware *intermediaire vectorbosonen* uitgewisseld. Het Z^0 -deeltje bijvoorbeeld is ongeveer even zwaar als een zirkoniumatoom, dat 40 protonen en 51 neutronen bevat. Dit geldt eveneens voor de andere intermediaire vectorbosonen, de W^+ - en W^- -deeltjes, die in 1983 zijn ontdekt.

De gedragingen van deeltjes vertonen een grote regelmaat. Deze regelmatigheden noemt men symmetrieën. Zij hangen nauw samen met de behoudswetten. Zo volgt uit de wet van behoud van impuls, dat de natuurkundewetten niet veranderen als een systeem wordt verplaatst. En uit het behoud van impulsmoment volgt dat als een fysisch systeem over een bepaalde hoek wordt gedraaid, de fundamentele natuurkundewetten evenmin veranderen.

Een behoudswet die niet samenhangt met een ruimtelijke symmetrie, is bijvoorbeeld de wet van behoud van elektrische lading. In deeltjesreacties blijkt de totale lading altijd constant te zijn. De overeenkomstige symmetrie van de op elektromagnetische vergelijkingen noemt men *ijsymmetrie*. In de quantumveldentheorie hangen deze ijsymmetrieën samen met het

3. Natuurkundigen zijn sinds ca. 1920 op zoek naar een theorie die de vier wisselwerkingen met elkaar verenigt. Iedere wisselwerking kenmerkt zich door de deeltjes die de kracht overdragen. Bij de zwaartekracht zouden dat gravitonen zijn en bij elektromagnetisme zijn dat fotonen. Bij de sterke wisselwerking dragen de gluonen de kracht over. Intermediaire Z^0 -, W^+ - en W^- -vectorbosonen zien we terug bij de zwakke wisselwerking.



3



4. Al is de zwaartekracht veruit de zwakste natuurkracht die we kennen, toch kan een valpartij zeer hard aan komen. Bungy-jumping is met name in Nieuw-Zeeland zeer populair. Met de voeten stevig gebonden aan een lange elastische snaar, springt deze man van een brug af. Luttele seconden later verhindert de rekkraft van de snaar dat hij op de bodem van de kreek te pletter slaat. Na het voltooien van een gedempte trilling kan hij in een boot klimmen. Wie volgt?

4

bestaan van ijkbosonen. Ijkbosonen zijn de dragers van de krachten die op de behouden lading werkt. Voorbeelden zijn het graviton voor de zwaartekracht en het foton voor de elektromagnetische wisselwerking.

Spin

Nu we enig zicht hebben op welke elementaire deeltjes er allemaal zijn en hoe ze elkaar beïnvloeden (zie voor een beknopt overzicht Tabel 1 en afbeelding 2), wijden we enkele volzinnen aan een belangrijke quantummechanische eigenschap van elementaire deeltjes, de *spin*. De-

ze neemt in het vervolg van ons verhaal een voorname plaats in.

Voor een draaiend lichaam, zoals de aarde die om haar as wentelt, is de natuurkundige grootte *impulsmoment* een maat voor de hoeveelheid draaiing van dat lichaam. Veel elementaire deeltjes hebben de quantummechanische, experimenteel geverifieerde eigenschap spin, een eigenschap die overeenkomsten vertoont met het impulsmoment. Daarom spreekt men zowel over spin als over het *intrinsiek impulsmoment* van deeltjes. Spin is een vector en heeft dus een grootte en een richting. Experimenteel is aangetoond dat wanneer wij van een



5. Deze foto werd in 1933 gemaakt tijdens een bijeenkomst ten behoeve van de vluchtelingen uit Duitsland. Aan de linkerzijde van Einstein zit Lord Rutherford.

5

deeltje de grootte van de spincomponent langs een willekeurige as meten, de uitkomst *gequantiseerd* is. De waarde die we vinden is altijd een veelvoud van $\frac{1}{2}\hbar$ waarbij \hbar gelijk is aan de constante van Planck gedeeld door 2π . Vergelijk dit maar met geld; er is een kleinste bedrag, één cent of één frank, en alle geldbedragen zijn een veelvoud daarvan.

Als we de spinwaarden van elementaire deeltjes gaan vergelijken, kunnen we de elementaire deeltjes verdelen in twee categorieën: de *fermionen* en de *bosonen*. Fermionen zijn deeltjes met een halftallige spinwaarde ($\frac{1}{2}\hbar$, $\frac{3}{2}\hbar$...). Alle materiedeeltjes (quarks en leptonen) behoren hiertoe. Bosonen zijn deeltjes met een heeltallige spinwaarde ($0, \hbar, 2\hbar$...). In deze groep vinden we alle wisselwerkingsdeeltjes terug: gravitonen, fotonen, gluonen en intermediaire vectorbosonen. Omdat fermionen en bosonen zich zeer verschillend gedragen, is dit onderscheid van fundamenteel belang. Een cruciaal verschil is dat bosonen in een fysisch systeem zich in dezelfde individuele toestand kunnen bevinden (zoals fotonen, wat een laser mogelijk maakt), terwijl dat bij fermionen uitgesloten is (denk hierbij aan de elektronen in een atoom die elk in een andere bron zitten). Dit is een gevolg van het zogenaamde

Uitsluitingsprincipe van Pauli dat essentieel is voor de verklaring van het Periodieke Systeem der elementen).

Unificatie

Met de vierglazige wisselwerkingbril op onze neuzen zullen wij thans een blik werpen op de geschiedenis van de natuurkunde aan de hand van afbeelding 6. De eerste wetenschappelijke theorie, in de moderne betekenis van het woord, van een wisselwerking is de Universele Gravitatietheorie van Newton die, samen met een geheel nieuwe mechanica, het licht zag in Newton's monumentale *Principia* (1687). De gravitatiewet $F = G m_1 m_2 r^{-2}$, waarin de universele gravitatieconstante G de sterkte van de gravitatie-wisselwerking bepaalt, heet *universeel* omdat deze wet geacht wordt te gelden voor alle vormen van materie in het gehele universum. Bezien in de context van de 17e eeuw kan men zeggen dat Newton's gravitatietheorie een *unificatie* tot stand bracht tussen de, tot dan toe gescheiden, *Ondermaanse mechanica* (waartoe de valwetten van Galileï werden gerekend) en *Bovenmaanse hemelmechanica* (bijvoorbeeld de wetten van Kepler van de planeetbanen).



Aan het begin van de 20e eeuw liet Einstein zien dat, als hij uitging van de eisen dat (1) fysische wetten dezelfde vorm moeten aannemen voor waarnemers die zich eenparig ten opzichte van elkaar bewegen, en (2) dat de lichtsnelheid in vacuüm voor al deze waarnemers dezelfde is, de mechanica en gravitatie theorie van Newton moesten worden generaliseerd. In de resulterende *Speciale* (1905) en *Algemene Relativiteitstheorie* (1916) worden ruimte en tijd met elkaar in verband gebracht in een overkoepelende ruimte-tijd, die dynamisch is omdat de kromming ervan variabel is. Een theorie waarin het door Einstein aangegeven verband tussen ruimte en tijd aanwezig is, noemen we *relativistisch*. De *Algemene Relativiteitstheorie*, als relativistische theorie van de gravitatie-wisselwerking, geldt vandaag de dag nog steeds als correct, zolang men zogeheten gravitationele quantumeffecten waarvoor geen experimenteel bewijs bestaat, verwaarloost.

De *Klassieke Elektrodynamica* (1873) bracht de elektriciteitsleer, ontwikkeld vanaf de tweede helft van de 18e eeuw, de fenomenologische kennis van het magnetisme, vergaard sedert de Middeleeuwen, en de golfoptica van het licht, ontstaan in het begin van de 19e eeuw, onder één noemer. Zelfs één van de later ont-

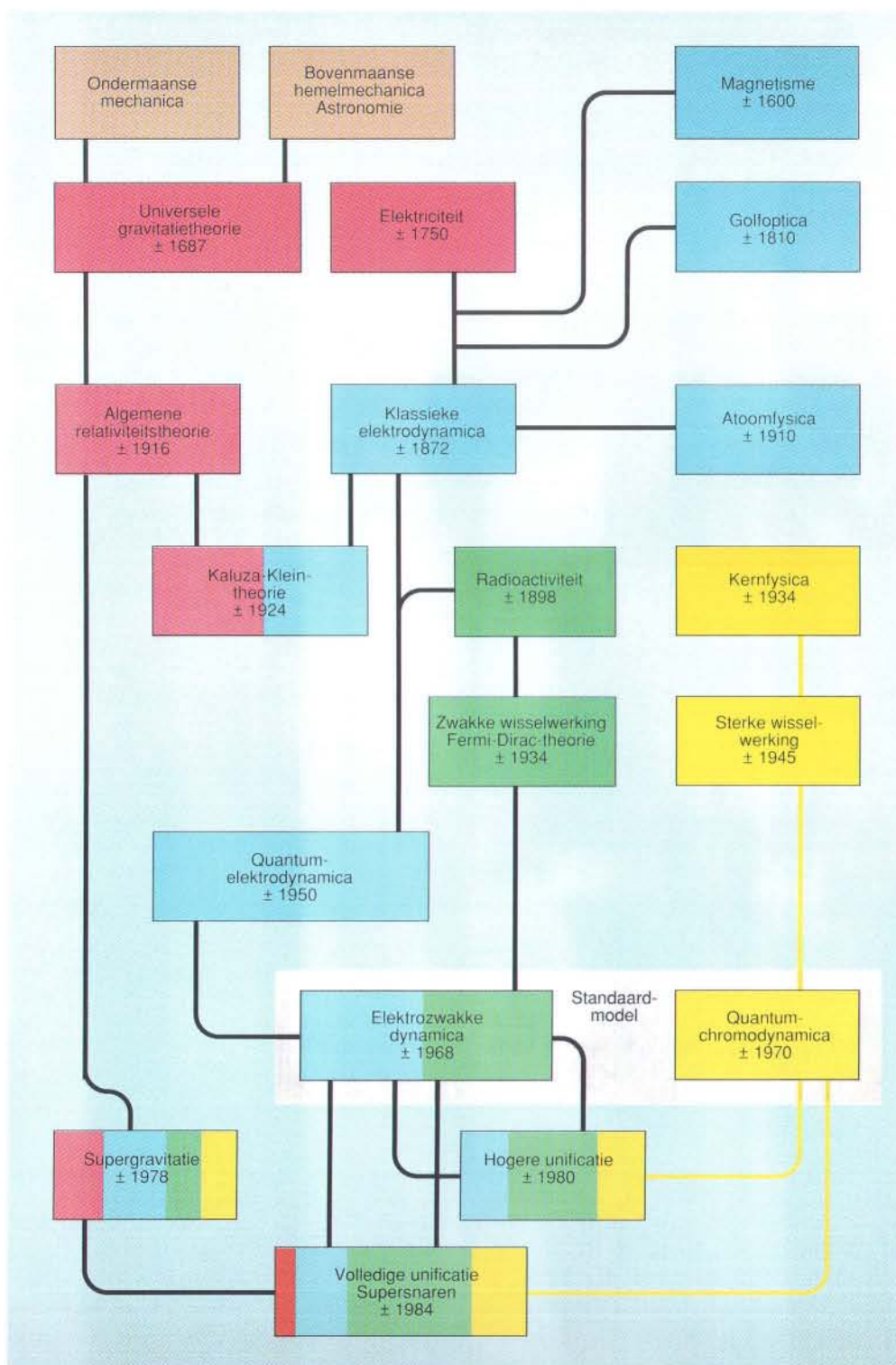
dekte soorten radioactieve straling, namelijk röntgenstraling, was herkenbaar als elektromagnetische straling en als zodanig onder te brengen bij de *Klassieke Elektrodynamica*. Zij is een van de mooiste voorbeelden van unificatie uit de geschiedenis van de natuurkunde.

Aan de hand van het lange-dracht karakter van gravitatie en elektromagnetisme, die zoals we al zagen met hun direct waarneembare gevolgen tot ons dagelijks leven behoren, is het te begrijpen dat juist voor deze wisselwerkingen het eerst goede theorieën zijn gevonden. Zowel de *Klassieke Elektrodynamica* als de *Algemene Relativiteitstheorie* beschrijven de wisselwerking tussen materiedeeltjes door middel van relativistische *klassieke velden*. De bekendste manifestatie van klassieke velden zijn de elektromagnetische golven uit de *Klassieke Elektrodynamica*. Dat zijn continue, periodieke, transversale velden, die zich met de lichtsnelheid door de ruimte voortplanten (golven) en een willekeurige hoeveelheid energie kunnen dragen; hiervan springt *licht* het meest in het oog. Het klassieke analogon in de *Algemene Relativiteitstheorie* zijn de gravitatiegolven, die nooit direct gedetecteerd zijn omdat zij zo ontzettend zwak zijn.

Afgepaste hoeveelheden

In 1900 veronderstelde Planck dat elektromagnetische straling alleen energie kan *overdragen* in afgepaste hoeveelheden van $E = h \nu$, in *quanta* (h is de constante van Planck, ν de frequentie van de straling); vijf jaar later betoogde Einstein dat elektromagnetische straling niets anders is dan een stroom afgepaste energiepakketjes of quanta (fotonen). In dit licht is het niet vergezocht alle vormen van elektromagnetische wisselwerking te beschrijven door de uitwisseling van fotonen; de gezochte relativistische quantumveldentheorie werd eind jaren veertig voltooid en heet de *Quantumelektrodynamica*.

De sterke en zwakke wisselwerking werden pas in de jaren dertig ontdekt. Dat hangt nauw samen met het korte-dracht karakter van deze krachten, waardoor hun directe gevolgen zich afspelen in een wereld die alleen maar toegankelijk is via omvangrijke, technisch hoogwaardige, experimentele apparatuur, de zogenaamde *subatomaire wereld*. Klassieke-veldentheorieën (theorieën die de wisselwerking van deel-



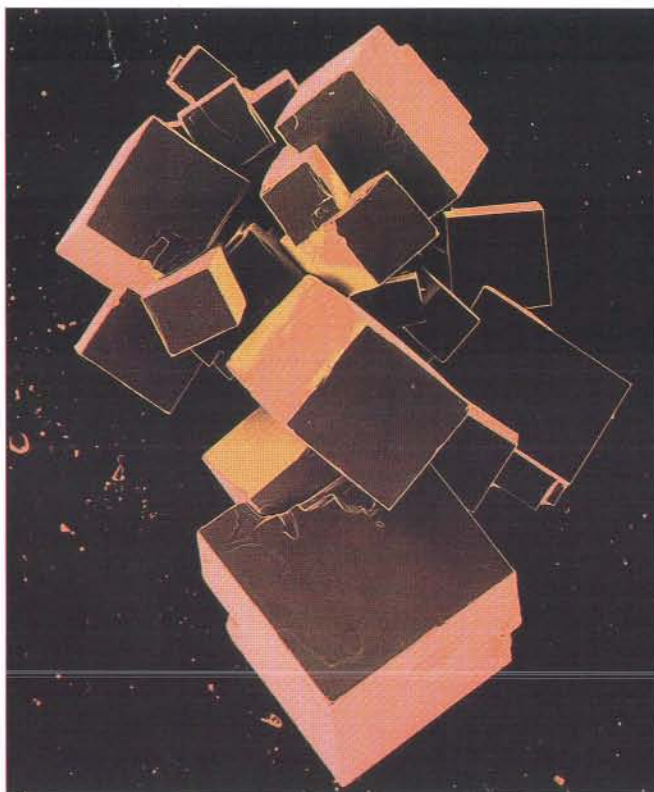
tjes met een veld beschrijven, bijvoorbeeld het elektromagnetische veld) zijn er van deze wisselwerkingen nooit geweest, omdat de natuurkundigen in de jaren dertig er al van doordrongen waren dat de subatomaire wereld uit *quanta* (deeltjes) bestaat. De *Quantumchromodynamica* (1971) is de algemeen aanvaarde relativistische quantumveldentheorie van de sterke wisselwerking en is geformuleerd in termen van quarks die onderling gluonen uitwisselen. De Fermi-theorie (1935) van de zwakke wisselwerking is met de Quantumelektrodynamica geünificeerd in de *Elektrozwakke Dynamica* (1968); deze theorie is de eerste geslaagde unificatie op quantumveldenniveau. De Quantumchromodynamica en de Elektrozwakke Dynamica vormen samen het zogenaamde *Standaardmodel*, dat dus drie van de vier wisselwerkingen — te weten elektromagnetische, zwakke en sterke wisselwerking — beschrijft met relativistische quantumveldentheorieën. Het Standaardmodel heeft glansrijk de confrontatie doorstaan met de resultaten van de meest uiteenlopende experimenten, uitgevoerd met de enorme deeltjesversnellers van CERN en DESY in Europa en van SLAC en Fermilab in de Verenigde Staten. Dit betekent dat we de wisselwerkingen, de fundamentele fysische processen van het universum, tot op een afstand van ongeveer 10^{-17} mm zowel kwalitatief als kwantitatief goed kunnen beschrijven. Maar we mogen niet vergeten dat het Standaardmodel maar liefst *zeventien* parameters bevat. Dat wil zeggen dat wetenschappers de getalswaarde van ze-

ventien eigenschappen van de elementaire deeltjes uit het Standaardmodel niet kunnen berekenen, maar dat ze die experimenteel moeten bepalen.

Tot nu toe hebben wij gesproken over theorieën die behoren tot de gevestigde natuurkundige kennis; thans verlaten we dit gebied en betreden we het domein van het speculatieve. Om te beginnen merken we op dat het op voorhand niet is uitgesloten dat er wisselwerkingen met een zeer korte dracht werkzaam zijn op veel kleinere afstandsschalen dan ongeveer 10^{-17} mm. De gevolgen van die wisselwerkingen zouden zich dan tot nu toe aan het experimentele oog hebben onttrokken.

Unificatie

In het verlengde van de veronderstelling dat de theorieën van de vier wisselwerkingen betrekking hebben op één en dezelfde fysische werkelijkheid, ligt de idee dat er één fysische theorie



6. Dit schema toont een reconstructie van de geschiedenis van de natuurkunde vanuit het standpunt van de wisselwerkingen. De vier wisselwerkingen zijn herkenbaar aan de kleuren in de vlakjes. De supersnaartheorie belooft de gezochte unificatie.

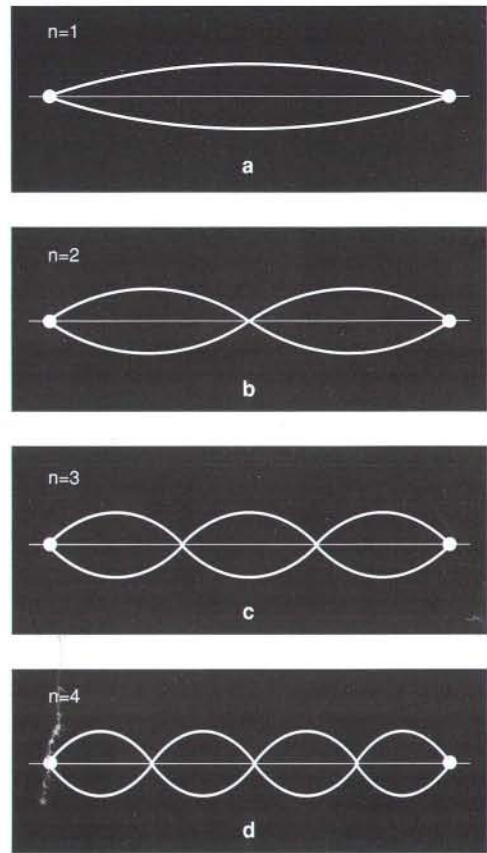
7. De bouw van een keukenzoutkristal is het gevolg van de elektromagnetische kracht; positieve natriumionen en negatieve chloorionen zijn met grote regelmaat gestapeld.

denkbaar is die alle vier de wisselwerkingen omvat, een zogenaamde *Volledige-Unificatietheorie*. Niemand was deze overtuiging hartstochtelijker toegedaan dan Einstein, die er de laatste dertig jaar van zijn leven naar heeft gezocht, maar hem niet heeft gevonden. Einstein zocht naar een klassieke veldentheorie en richtte zich hoofdzakelijk op de Klassieke Elektrodynamica en zijn Algemene Relativiteitstheorie. Hij vond de quantumtheorieën onvolledig en dacht dat ze mettertijd plaats zouden maken voor betere theorieën, niet-lineaire klassieke, dat wil zeggen deterministische theorieën. Zijn hoop was gevestigd op een geünificeerde klassieke-veldentheorie, die alle vier de wisselwerkingen zou omvatten. Veel theoretisch-natuurkundigen na Einstein delen zijn unificatie-overtuiging, maar denken dat de Volledige-Unificatietheorie een relativistische-quantumveldentheorie moet zijn, geen klassieke-veldentheorie. Deze gedachte wordt gevoed door het empirische succes van het Standaardmodel, dat ondubbelzinnig in deze richting wijst.

De Elektrozwakke Dynamica en de Quantumchromodynamica vertonen een grote conceptuele en wiskundige gelijkenis, zodat men eerst geprobeerd heeft het Standaardmodel te unificeren in zogenaamde *Hogere-Unificatietheorieën*. Hogere-Unificatietheorieën uit de jaren tachtig voorspelden onder andere het verval van het proton, dat tot dan toe altijd voor stabiel was gehouden. Hoopvol zijn grootschalige experimenten uitgevoerd om het protonverval te meten, echter alle tevergeefs.

Een ander probleem, waar de theoretische natuurkunde haar tanden op stuk bijt, is dat van de *quantumgravitatie*; alle pogingen om een quantumveldentheorie voor de gravitatie-wisselwerking te bedenken, waarin deeltjes met massa onderling gravitonen uitwisselen, lopen al sinds jaar en dag wiskundig op de klippen. Het lijkt of de geest van Einstein in de Algemene Relativiteitstheorie rondwaart en haar met vuur en zwaard verdedigt tegen iedere kwantiseringpoging. Wat vast staat, is dat als het graviton bestaat, het geen massa heeft (vanwege de lange dracht van de zwaartekracht) en een boson is met spinwaarde $2\hbar$.

Hoe dwingend de succesvolle unificaties uit het verleden ook mogen zijn voor het geloof in het bestaan van een Volledige-Unificatietheorie, de weg erheen is geblokkeerd door het em-



pirisch falen van de Hogere-Unificatietheorieën en door de onmogelijkheid de gravitatie-wisselwerking te kwantiseren. Supersnaartheorieën bieden een nieuwe visie op quantumgravitatie en unificatie, door de veronderstelling te verlaten die misschien wel de meest gevestigde is van de fysica, namelijk dat het universum is opgebouwd uit ondeelbare deeltjes die elkaar wederkerig beïnvloeden.

Klassieke snaren

Wij zullen het concept *supersnaar* stapsgewijs introduceren. Daartoe beginnen we met de *klassieke snaar*. In de fundamentele vergelijkingen van zowel de klassieke mechanica als de quantummechanica komen de afmetingen van deeltjes niet voor; ze hebben effectief geen afmetingen en zijn derhalve *puntdeeltjes*, topologisch nuldimensionale objecten. Experimen-



9

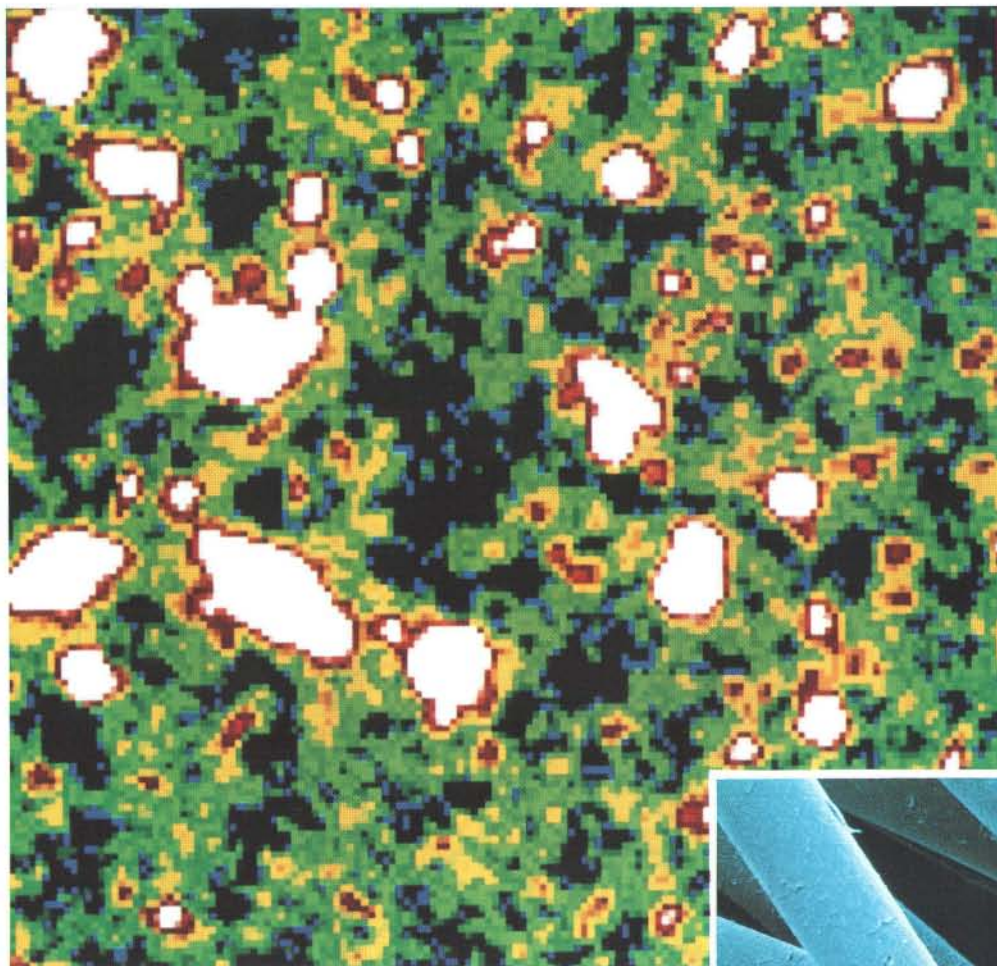
8. De klassieke vioolsnaar kan zich in aftelbaar oneindig veel trillingstoestanden bevinden. De golflengte van de grondtoon komt overeen met de dubbele snaarlengte (a). Bij de eerste harmonische boventoon zijn de snaarlengte en de golflengte gelijk (b). De golflengten van volgende harmonische boventonen zijn gelijk aan tweemaal de snaarlengte, gedeeld door een geheel getal plus één.

9. Een muziekstuk met enkel harmonische boventonen is vrij saai. Een strijker verkrijgt uiteenlopende transversale trillingen door de effectieve snaarlengte te wijzigen. De massa van de diverse snaren is mede bepalend voor de toonhoogte.

teel blijkt dat elementaire deeltjes kleiner zijn dan circa 10^{-17} mm. We maken nu de stap van nuldimensionale naar éédimensionale objecten, van puntdeeltjes naar lijndeeltjes, die we *snaren* zullen noemen. Puntdeeltjes hebben geen afmetingen, snaren hebben één afmeting, de zogenaamde *snaarlengte* L.

Laten we eens kijken hoe een snaar zich gedraagt volgens de klassieke (niet-relativistische) mechanica; denk hierbij aan een vioolsnaar. Als de viool beweegt, bijvoorbeeld wanneer de violist op tournee gaat, bewegen de snaren mee; we zullen dit de *globale snaarbeweging* noemen. Als de viool niet reist, kunnen de snaren toch bewegen, namelijk wanneer de violist de snaren aanstrijkt en ze in trilling brengt of wanneer de viool ronddraait; dit zullen we de *relatieve snaarbeweging* noemen. De klassieke mechanica beschrijft de globale snaarbeweging door de baan die het zwaarte-

punt van de snaar doorloopt. Als de viool in het zwaartekrachtsveld van de aarde beweegt, hebben de snaren naast kinetische energie (bewegingsenergie) ook potentiële energie (gravitatie-wisselwerkingsenergie). In het algemeen is de energie van het zwaartepunt van een snaar, $E_{\text{zwaartepunt}}$, gelijk aan de globale snaarbewegingsenergie plus de wisselwerkingsenergie. Wat globale snaarbewegingen betreft, doet de klassieke mechanica kennelijk alsof snaren puntdeeltjes zijn; het verschil treedt pas op de voorgrond als we naar de relatieve snaarbewegingen luisteren. In een trillende snaar lopen golven heen en weer. Als de trillingsrichting loodrecht op de snaar staat, zoals bij een vioolsnaar, spreekt men van *transversale golven*; als de snaar in haar lengterichting trilt, spreekt men van *longitudinale golven*. In een driedimensionale ruimte kan een snaar in twee dimensies transversaal en in één dimensie longitudinaal



10

trillen. De Fourier-analyse leert ons dat we iedere golf opgebouwd kunnen denken uit sinusvormige golven; iedere viooltoon is de som van de grondtoon van de snaren en hun harmonische boventonen. De snaarlengte L bepaalt de golflengten; voor de grondtoon geldt $L = \frac{1}{2} \lambda_0$ en voor de n -de harmonische boventoon geldt $L = \frac{1}{2}(n+1) \lambda_n$ (afb. 8). De *snaarspanning* T bepaalt de snelheid v waarmee de golven heen en weer lopen in de snaar (v is omgekeerd evenredig met \sqrt{T}) en daardoor hun frequentie: $\nu_n = v/\lambda_n$. Iedere violist is met dit verschijnsel vertrouwd: het strakker spannen van de snaren geeft hogere tonen. Kortom, de twee parameters snaarlengte L en snaarspanning T bepalen de relatieve snaarbeweging en daarmee de

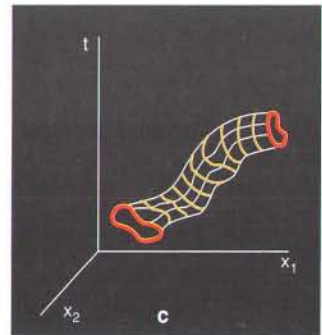
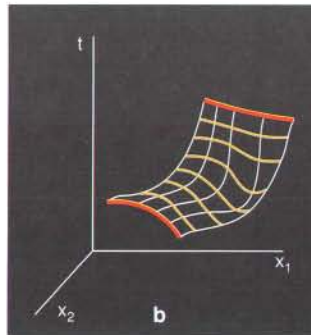
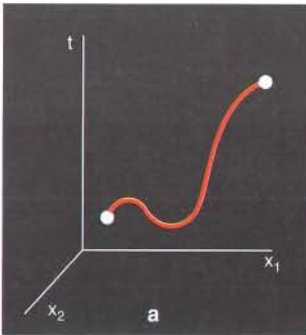


11

energie E_{rel} die de snaar heeft ten gevolge van de golfbewegingen en de draaiingen. De totale energie van de klassieke snaar is dan som van de globale en relatieve energiebijdragen: $E_{\text{klassiek}} = E_{\text{zwpt}} + E_{\text{rel}}$. Een snaar onderscheidt zich van een puntdeeltje door de aanwezigheid van de tweede term, E_{rel} . Gewapend met deze inzichten in de klassieke snaar kunnen we de *relativistische snaar* te lijf gaan.

Relativistische snaren

We zullen hier de beweging en de energie bespreken van de vrije relativistische snaar. De viool verdwijnt in de vioolkist en bij snaren stellen we ons vanaf dit moment lijndeeltjes voor. Er zijn twee mogelijke snaren, te weten *open snaren* en *gesloten snaren*. Open snaren hebben twee uiteinden, net zoals een eindje touw. Bij



12



10 en 11. De verste objecten die moderne telescopen kunnen waarnemen, bevinden zich zo'n vijftien miljoen lichtjaar van ons vandaan (10). De lengte van een supersnaar verhoudt zich tot de dikte van een mensenhaar (11), zoals deze dikte zich verhoudt tot die astronomische afstand.

12. De positie van een puntdeeltje in de ruimte-tijd geeft men weer met een wereldlijn. Als we in de ruimte-tijd het oneindige aantal punten weergeven waaruit een open snaar bestaat, verkrijgen we een wereldoppervlak. Het wereldoppervlak van een gesloten snaar heeft de vorm van een buis.

gesloten snaren zijn er geen uiteinden, ze lijken op een elastiekje.

In een snaarwereld doet zich onmiddellijk de volgende vraag voor: als het universum in laatste instantie niet uit puntdeeltjes maar uit lijndeeltjes bestaat, hoe is het dan mogelijk dat alle moderne fysische theorieën waarin men uitgaat van puntdeeltjes, experimenteel worden bevestigd? Het antwoord luidt: omdat een lijndeeltje dusdanig kleine afmetingen heeft, dat het in de subatomaire wereld niet experimenteel te onderscheiden is van een puntdeeltje. We mogen dus concluderen dat voor de snaarlengte geldt, dat deze veel kleiner is dan 10^{-17} mm. In de subatomaire wereld doet een snaartje zich voor als een deeltje, dat we het met de snaar geassocieerde deeltje zullen noemen.

Sinds de komst van de Speciale Relativiteitstheorie weten we dat alles zich afspeelt in het vierdimensionale ruimte-tijdcontinuüm. De ruimte-tijd-punten (x, t) van de gebeurtenissen die het verleden, heden en toekomst van een puntdeeltje vormen, noemen we zijn *wereldlijn*. Een snaartje bestaat uit oneindig veel punten en heeft dientengevolge oneindig veel wereldlijnen die zijn *wereldoppervlak* vormen

(afb. 12). Als we de bewegingsvergelijkingen voor een vrij relativistisch puntdeeltje afleiden, vinden we als oplossing de *eenparige rechtlijnige beweging*. De oplossing voor de bewegingsvergelijkingen voor een vrij relativistisch snaartje komt overeen met de som van een globale en relatieve beweging. De globale beweging vatten we op als de beweging die het zwaartepunt van het snaartje uitvoert en is gelijk aan die van een vrij relativistisch puntdeeltje, namelijk een eenparige rechtlijnige beweging. Van de relatieve bewegingen die een snaartje kan uitvoeren, zijn natuurkundig gezien alleen rotaties en transversale trillingen van belang, geheel analoog aan de relatieve bewegingen van de klassieke vioolsnaar en aan het elektromagnetisch veld.

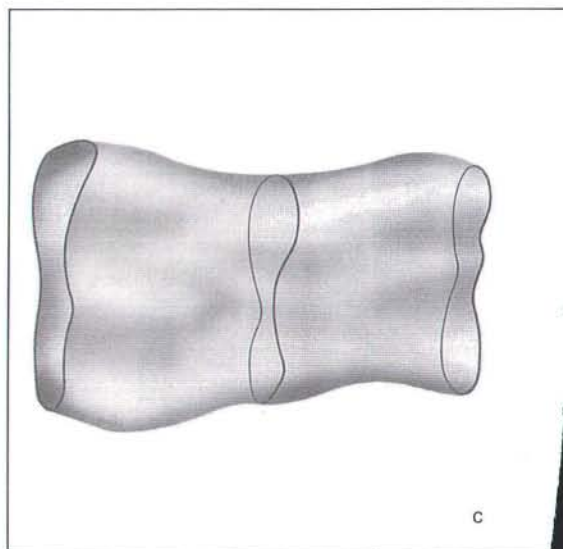
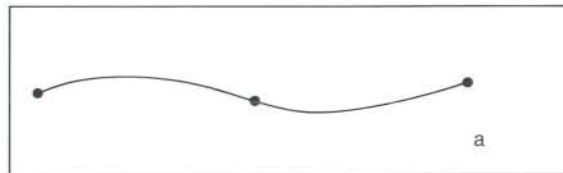
Snaartje en deeltje

Alvorens we de energie van een vrije relativistische snaar onder de loep nemen, zullen we eerst iets uit de Speciale Relativiteitstheorie in herinnering brengen. De Speciale Relativiteitstheorie heeft onthuld dat het onderscheid tussen massa en energie niet essentieel, maar graadueel is; de massa m van een puntdeeltje of snaartje in rust is gelijkwaardig met een hoeveelheid *rustenergie* E_0 : $E_0 = m c^2$. Zoals we reeds zagen bij de beschrijving van de klassieke snaren, kunnen we voor de totale energie van een snaar schrijven: $E_{\text{snaar}} = E_{\text{zwpt}} + E_{\text{rel}}$. Wanneer we deze uitdrukking vergelijken met de uitdrukking voor de energie van een vrij relativistisch puntdeeltje, ontstaat bij benadering het volgende verband: de globale snaarbewegingsenergie is gelijk aan de kinetische energie van het met de snaar geassocieerde deeltje. De relatieve snaarbewegingsenergie komt overeen met de rustenergie van het geassocieerde deeltje: $E_{\text{rel}} = E_0$. Iedere trilling die voldoet aan de bewegingsvergelijkingen voor de relativistische snaar, heeft een specifieke energie E_{rel} en een frequentie ν die gelijk is aan $E_{\text{rel}} h^{-1}$; deze energie legt de massa van het geassocieerde deeltje vast: $m = E_{\text{rel}} c^{-2}$. De massa van een elementair deeltje is dus een gevolg van het feit dat er golven in de snaar lopen. Aangezien de snaarparameter T de relatieve snaarbeweging en bewegingsenergie E_{rel} bepaalt, zullen we uiteindelijk de massa's van alle elementaire deeltjes uit de spanning T van één elementair snaartje moeten kunnen berekenen!

De relativistische snaar heeft nu maar een parameter en dat is de snaarspanning T . De uiteinden van de snaar moeten namelijk met de lichtsnelheid ronddraaien om te voorkomen dat de snaar onder invloed van de snaarspanning instort tot een punt. Dit legt de snaarlengte vast in termen van T .

Zoals gezegd voert de de snaar een zwaartepuntsbeweging uit, vergelijkbaar met de beweging van een puntdeeltje, met daarbovenop de rotatie- en vibratiebewegingen van de snaar. De spin van de geassocieerde deeltjestoestand kunnen we ruwweg begrijpen als het impulsmoment van de relatieve beweging ten opzichte van het zwaartepunt.

We kunnen dus twee belangrijke eigenschappen van elementaire deeltjes, te weten massa en spin, beschouwen als respectievelijk de energie en het impulsmoment van de snaartrillingen. En uiteindelijk moeten de massa's van de elementaire deeltjes te berekenen zijn uit de snaarspanning T van één elementair snaartje door allerlei verschillende trillingstoestanden te beschouwen.



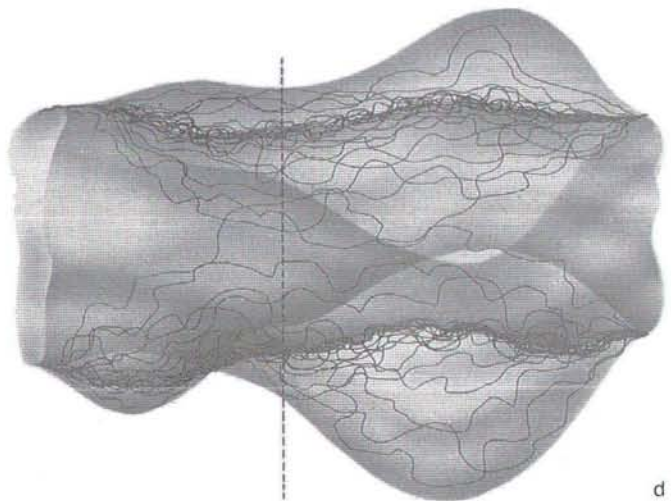
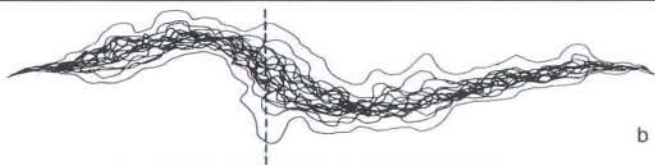
Het is vervolgens nodig dat we de snaar *quantiseren*. Eén van de redenen hiervoor is, dat het impulsmoment van de relativistische snaar een continue grootte is terwijl de spin van elementaire deeltjes een gequantiseerde grootte is.

Quantumsnaren

Het quantiseren van de relativistische snaar tot een zogenaamde *quantumsnaar* kan op allerlei manieren en deze zijn in de loop van de jaren tachtig allemaal beproefd. Het zou te ver voeren ze allemaal de revue te laten passeren; bovendien is quantiseren een wiskundige aangelegenheid. Om toch een idee te krijgen van de quantumsnaar, kunnen we het quantiseren van de snaar het beste vergelijken met de manier waarop Bohr in 1913 het waterstofatoom quantiseerde.

Toen Rutherford in 1911 ten tonele verscheen met een atoommodel waarin negatief geladen elektronen in verhoudingsgewijs enorme banen om een positief geladen kern bewe-

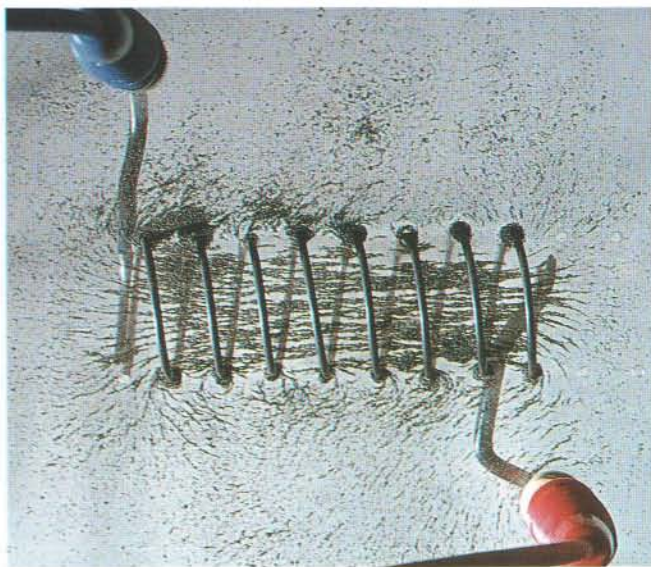
gen, stelde de evidente stabiliteit van atoomkernen het natuurkundig publiek voor een probleem. Want volgens de Klassieke Elektrodynamica zouden de ronddraaiende elektronen straling uitzenden, daardoor energie verliezen en onder invloed van de aantrekkende elektrische kracht van de kern er vrijwel onmiddellijk instorten. Voor het waterstofatoom postuleerde Bohr dat er maar een beperkt aantal banen is waarin het elektron kan bewegen. Beweegt het elektron in de dichtst bij de kern toegestane baan, dan bevindt dit atoom als geheel zich in de *grondtoestand*, de toestand met de laagste energie E_0 . Als het elektron daarentegen beweegt in de eerstvolgende toegestane baan, dan bevindt het atoom zich in de *eerste aangeslagen toestand* met energie E_1 enzovoort. Zonder hulp kan het elektron niet uit een baan ontsnappen, zodat normaal gesproken het atoom in de grondtoestand gevangen zit; dit 'verklaart' de stabiliteit van het waterstofatoom. Hulp kan zich aandienen in de vorm van een foton; als men een waterstofatoom in de grondtoestand beschijnt met elektromagnetische



13. In de quantummechanica maakt de enkele wereldlijn van een puntdeeltje (a) plaats voor een oneindig aantal wereldlijnen (b). De dichtheid van de wereldlijnen in een doorsnede op tijdstip t is evenredig met hun bijdrage aan de kans het deeltje daar aan te treffen. Op gelijke wijze verandert ook het wereldoppervlak van een klassieke gesloten snaar (c) in een grote hoeveelheid mogelijke wereldoppervlakken die alle bijdragen aan de quantumsnaar (d).

14. Het elektromagnetisch veld kunnen we zichtbaar maken door ijzer-vijlsel op een vlak door een spoel te strooien. Zou het magnetische krach-tenspel in feite een wisselwerking tussen supersnaren zijn?

15. Aan Niels Bohr hebben we het be-grip quantumgetal te danken. Hij pas-te het atoommodel van Rutherford aan, waarbij elektronen zich slechts in een aantal discrete banen konden be-vinden. De omtrek van de elektronen-banen in dit model komen overeen met een geheel aantal maal de golf-lengte van een elektron volgens de methode van De Broglie.



14

straling van frequentie ν zodat $h\nu = E_1 - E_0$, dan absorbeert het elektron een foton waarbij het springt naar de eerstvolgende baan (de be-roemde *quantumsprong*). Het atoom parkeert in de eerste aangeslagen toestand. De toestand van een atoom kan dus alleen veranderen als er wisselwerking plaatsvindt, in dit geval elektro-magnetische wisselwerking via een foton. Na enige tijd valt het atoom terug in de grondtoe-stand onder uitzending van een foton met de-zelfde energie. Zo kon Bohr ook het bestaan van spectraallijnen verklaren, dat wil zeggen het feit dat waterstof een spectrum van discrete lijnen heeft in plaats van een continu spectrum: iedere lijn correspondeert met een overgang tussen twee energieniveaus.

In het algemeen wordt een fysisch systeem beschreven door een aantal relevante fysische grootheden. Bij het waterstofatoom zijn dat massa, lading, spin, energie, impuls, baanimpulsmoment en magnetisch moment.

De quantumsnaar kan zich, net als een wa-terstofatoom, in allerlei *quantumtoestanden* bevinden. De fysische grootheden die een quantumtoestand volledig vastleggen moeten overeenkomen met de eigenschappen van het geassocieerde deeltje, zodat iedere quantum-toestand van de quantumsnaar correspondeert met een elementair deeltje. Het spectrum van de quantumsnaar is de verzameling toegestane

waarden voor de relatieve energie E_{rel} , die zul-len moeten corresponderen met de massa's van de elementaire deeltjes: $m = E_{rel} c^{-2}$. Een ul-tiem doel van de snaartheorie is *alle* eigen-schappen van de elementaire deeltjes, in het bijzonder de zeventien parameters van het Standaardmodel, uit te drukken in de snaar-spanning T . Nadat we enkele woorden hebben gewijd aan *supersymmetrie*, zullen we enige aandacht besteden aan een veelbelovende quantumsnaar, de zogenaamde *supersnaar*.

Supersymmetrie

Een meetkundig figuur (parallelogram, pira-mide, bol, ellips enzovoort) die samenvalt met zijn spiegelbeeld is *spiegelsymmetrisch*. In de meetkunde zijn er natuurlijk meer afbeeldin-gen dan spiegelen, zoals draaien en verschui-ven; deze worden transformaties genoemd. Bij *supersymmetrie* moeten we ons het volgende voorstellen: de getransformeerde van een fer-mion is een *sfermion*, dat is een boson dat op de spinwaarde na identiek is aan het fermion. Analoog hieraan wordt een boson afgebeeld op een *bosino*, een fermion dat op de spinwaarde na identiek is aan het boson (zie Tabel 2). Zo ontstaan supersymmetrische paren: fermion-sfermion en boson-bosino. Het zou schitterend zijn als we alle bestaande bosonen en fermio-



15

nen op deze manier aan elkaar konden koppelen, want dan verschijnt de langgezochte, volledige unificatie aan de horizon. Helaas is dat vooralsnog niet experimenteel bevestigd; de supersymmetrische partner van het foton bijvoorbeeld, het fotino, is een ongeladen fermion dat nog nooit in een experiment is gezien.

Bij het ontwerpen van het Standaardmodel is ijkssymmetrie een belangrijke leidraad geweest. De intermediaire vectorbosonen, die zorgen voor de overdracht van de zwakke en de elektromagnetische kracht, waren zelfs op louter ijkssymmetrische gronden voorspeld, voordat ze uiteindelijk experimenteel werden gevonden. Supersymmetrie is evenzo een belangrijke leidraad bij het ontwerpen van Volledige-Unificatietheorieën. In 1976 werd de eerste supersymmetrische theorie ontworpen, waarin een massaloos deeltje voorkomt met spin = $2\hbar$, een uitstekende kandidaat voor het graviton. Deze theorie bood dus niet alleen uitzicht op volledige unificatie, maar tevens op quantumgravitatie; men sprak daarom van *supergravitatie* (afb. 6). De supergravitatietheorieën hebben enkele jaren in het centrum van de belangstelling gestaan. Spijtig genoeg bleken ze ernstige beperkingen te hebben, en in het begin van de jaren tachtig was het eerste enthousiasme aanzienlijk getaand.

In 1984 presenteerden John Schwarz en Michael Green, twee vooraanstaande snaartheoretici, de veelbelovende Supersymmetrische snaartheorie op het Congres voor Anomalieën, Topologie en Meetkunde te Chicago. En deze theorie leek alle beperkingen te omzeilen. Een levensvatbare *supersnaar* was geboren. En sindsdien is het aantal snaarfysici zo schrikba-

TABEL 2 De elementaire deeltjes en hun supersymmetrische partners

Bekend			Onbekend		
Deeltje	Spin (\hbar)	Massa (GeV/c ²)	Deeltje	Spin (\hbar)	Massa (GeV/c ²)
Quarks	1/2	0,3 →	Squarks	0	?
Leptonen	1/2	0 – 0,1	Sleptonen	0	?
Foton	1	0	Fotino	1/2	?
Gluon	1	0	Gluïno	1/2	?
Graviton	2	0 (?)	Gravitino	3/2	?
W ⁺ , W ⁻	1	83	Wino	1/2	?
Z ⁰	1	91	Zino	1/2	?
H ⁺ , H ⁻ , H ⁰	0	?	Hino	1/2	?

rend toegenomen dat Sheldon Glashow, één van de architecten van het Standaardmodel, 'supersnaren gevaarlijker acht dan het AIDS-virus,' gezien de verspreiding ervan onder theoretische natuurkundigen.

Supersnaren

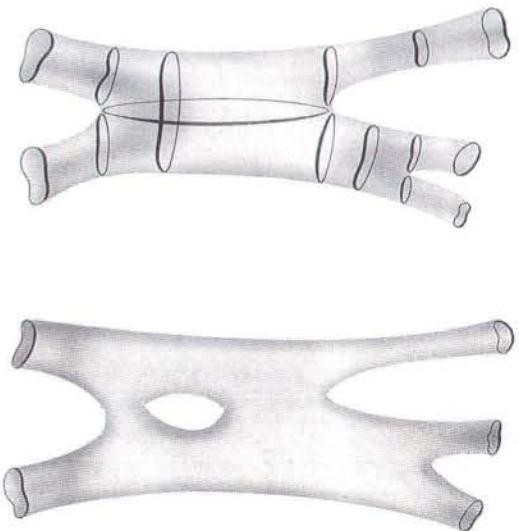
Een *supersnaar* is een relativistische, supersymmetrische quantumsnaar. We gaan een blik werpen op een supersnaar die ten gehore is gebracht door het *Princeton String Quartet* met David Gross als primarius, de zogenaamde *heterotische supersnaar* (1986). In alle niet-supersymmetrische-snaartheorieën was het kwadraat van de massa van het, met de snaar in de grondtoestand geassocieerde deeltje negatief ($m_0^2 < 0$), zodat het deeltje volgens de Speciale Relativiteitstheorie sneller dan het licht moest bewegen, het was een *tachyon*. Dit was erg vervelend, omdat tachyonen voor een instabiliteit in het spectrum van de supersnaar zorgen.

In het spectrum van de heterotische supersnaar komen geen tachyonen voor. Het laagste energieniveau van de heterotische supersnaar ($E_{\text{rel}} = 0$) telt 8064 verschillende quantumtoestanden en biedt zodoende plaats aan een vergelijkbaar aantal massaloze deeltjes ($m = E_{\text{rel}} c^{-2} = 0$). Het eerstvolgende toegestane energieniveau wordt bevolkt door 18 883 584 geassocieerde deeltjes die wel een massa hebben. De massa's van de deeltjes die behoren bij het n -de energieniveau, zijn evenredig met de wortel uit de snaarspanning: $m = n \alpha \sqrt{T}$ (evenredigheidsconstante $\alpha = 2 \sqrt{(\hbar c^{-3})}$). Op ieder energieniveau zijn zowel bosonen als fermionen aanwezig; derhalve mogen we concluderen dat we met deze supersnaar over een theorie beschikken die ruimte biedt aan alle bekende elementaire deeltjes en daarom kan worden beschouwd als een serieuze kandidaat voor de Volledige-Unificatietheorie.

Van de grootte van de snaarparameter T hebben onderzoekers een fenomenologische schatting kunnen maken door supersnaren in de graviton-quantumtoestand te laten wisselwerken en dit te vergelijken met de universele gravitatieconstante G . De snaarlengte is van dezelfde grootte als de *Plancklengte*: $L = \sqrt{(\hbar G c^{-3})}$, ongeveer 10^{-32} mm. Deze zeer kleine afmeting is in overeenstemming met de eerder getrokken conclusie dat L veel kleiner is

dan 10^{-17} mm. De massa's van de geassocieerde deeltjes blijken dan evenredig met veelvouden van de *Planckmassa* $M = \sqrt{(\hbar c G^{-1})}$, ongeveer $10^{19} \text{ GeV } c^{-2}$ ofwel 10^{-5} g . Omdat alle bekende elementaire deeltjes een massa hebben kleiner dan $10^2 \text{ GeV } c^{-2}$, ongeveer 10^{-22} g , zijn ze massaloos in verhouding tot de Planckmassa en zijn ze dus geassocieerde deeltjes van de supersnaar in de grondtoestand. De snaarspanning kunnen we berekenen via de formule $T = M^2 \alpha^{-2}$ en komt overeen met het gewicht van een massa van ongeveer 10^{38} ton! Geassocieerde deeltjes die niet in de grondtoestand verkeren, zijn instabiel en vervallen naar die toestand. Bij de huidige toegankelijke energieën zijn ze bovendien niet te maken.

Tenslotte bespreken we het optreden van de *kritische dimensie D van de ruimte-tijd*, een typisch snaartheoretisch verschijnsel. Er geldt dat: als er negen ruimtelijke dimensies en één tijdsdimensie zijn ($D = 10$) en de snaar trilt in acht dimensies, dan is de supersnaartheorie consistent met de Speciale Relativiteitstheorie (en is er de correcte afhankelijkheid van ruimte en tijd). Dat we het bestaan van zes extra ruimtelijke dimensies moeten aannemen ($9 - 3 = 6$) is bijzonder vervelend. Vanuit theoretisch standpunt is het optreden van een zogenaamde *kritische dimensie D* echter ook bijzonder interessant: er is blijkbaar alleen een relativistische



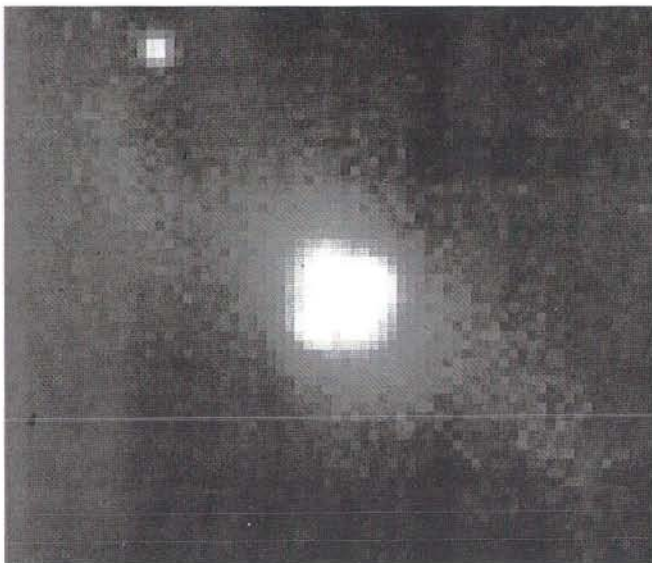
supersnaartheorie mogelijk als de supersnaar in een tiendimensionale ruimte-tijd bestaat en in acht ruimtelijke dimensies trilt. Via de Algemene Relativiteitstheorie heeft *de structuur van de ruimte-tijd* haar intrede gedaan in de natuurkunde, via de supersnaartheorie doet *het aantal dimensies van de ruimte-tijd* zijn intrede.

Maar is het *mogelijk* dat er meer dan drie ruimtelijke dimensies bestaan? Ja, er kunnen zes extra ruimtelijke dimensies bestaan, mits ze *gecompatificeerd* zijn.

Compactificatie

In het hart van de Algemene Relativiteitstheorie liggen de vergelijkingen van Einstein, die zijn geformuleerd in een vierdimensionale ruimte-tijd. Theodor Kaluza bekeek in 1919 deze vergelijkingen in een vijfdimensionale ruimte-tijd en kon daaruit, naast de vergelijkingen van Einstein natuurlijk, ook de vergelijkingen van Maxwell afleiden, die het fundament van de Klassieke Elektrodynamica zijn. Daarmee leek de unificatie mogelijk van gravitatie en elektromagnetisme, de twee lange-dracht-wisselwerkingen, in de vorm van een klassieke veldentheorie. Kaluza stuurde zijn bevindingen in een brief aan Einstein, die enthousiast terugschreef erg onder de indruk te zijn. Maar een *vijfde* dimensie bleef een probleem.

Kaluza had de vijfde dimensie beschreven met een *periodieke coördinaat*. Dit kunnen we vergelijken met een hoek die een periode heeft van 360° : als men een lichaam een geheel aantal keer 360° draait, keert het in de uitgangspositie en -stand terug. Oscar Klein toonde in 1926 aan dat we de vijfde dimensie zo klein kunnen *oprollen* dat het bestaan ervan niet in strijd is met onze ervaring. Om in te zien wat we ons daarbij moeten voorstellen, gaan we aan de hand van afbeelding 19 het vlak oprollen tot een zwemband. Het vlak is in twee dimensies oneindig en onbegrensd. Als we één dimensie oprollen tot een cirkel ontstaat er een cilindermantel, dat is ook een tweedimensionale ruimte waarvan één dimensie nog steeds oneindig en onbegrensd is, maar waarvan de andere dimensie *eindig* en onbegrensd is. Eindig, want indien r de *kromtestraal* is van de opgerolde dimensie, dan is de grootte $2\pi r$, de cirkelomtrek. Wanneer we tevens de tweede dimensie oprollen, ontstaat een zwemband: een tweedimensionale eindige, onbegrensde ruimte. Platland is veranderd in Zwembandland. In het algemeen spreekt men van *compactificatie*. Klein berekende uit de sterkte van de gravitatie-wisselwerking en de elektromagnetische wisselwerking dat de kromtestraal r van de vijfde dimensie 10^{-32} mm bedraagt, waarvan derhalve alleen iets te merken valt in de wereld die klei-



17

16. Wisselwerkingen tussen gesloten snaren kunnen we op twee manieren bekijken. In a zien we hoe twee snaren met elkaar botsen en er uiteindelijk drie snaren ontstaan. In plaats van het wereldoppervlak te bekijken, kan men ook de snaren zelf bestuderen (b). Wereldoppervlakken van wisselwerkende snaren kunnen de vreemdste vormen aannemen.

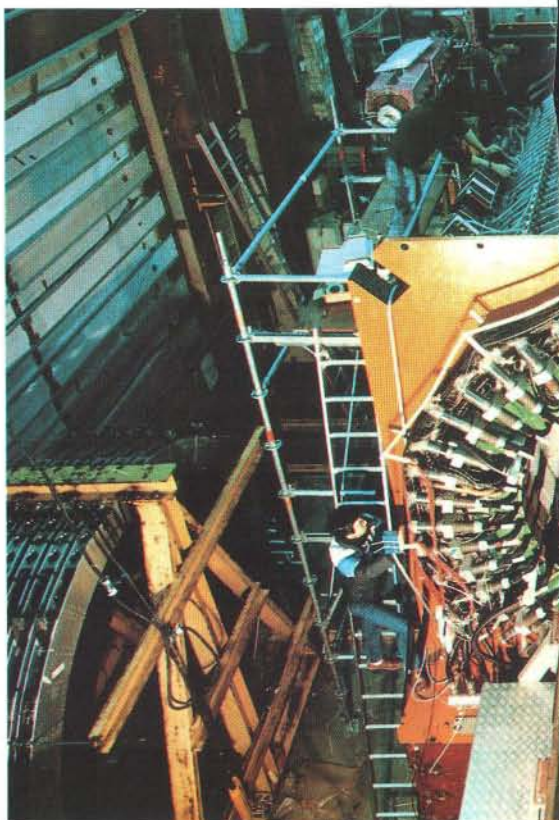
17. In de vakliteratuur is inmiddels het begrip kosmische snaren opgedoken. Supersnaren met een grote massa zouden bijvoorbeeld een rol spelen als gravitatiëns, die ervoor zorgt dat we verre sterrenstelsels meerdere malen waarnemen. Dat laatste is bijvoorbeeld het geval in Einsteins Kruis.

ner is dan het subatomaire; in de macrowereld, direct toegankelijk voor onze zintuigen, en in de subatomaire wereld, is van een vijfde dimensie dan geen spoor te bekennen. De kromtestraal r verhoudt zich tot het waterstofatoom als het waterstofatoom tot het zonnestelsel; we mogen er dus rustig vanuit gaan dat atomen niet in de vijfde dimensie passen, tenzij iemand ons zonnestelsel in een waterstofatoom kan verstoppen. Bij enorme uitvergroting kan pas blijken dat een *compacte dimensie* ook werkelijk bestaat. Het probleem van de vijfde dimensie was dus niet onoverkomelijk. Niettemin taande het enthousiasme voor de theorie van Kaluza en Klein, uiteindelijk een klassieke veldentheorie, toen in de jaren dertig het quantumkarakter van de subatomaire wereld niet alleen theoretisch maar evenzeer experimenteel manifest was geworden.

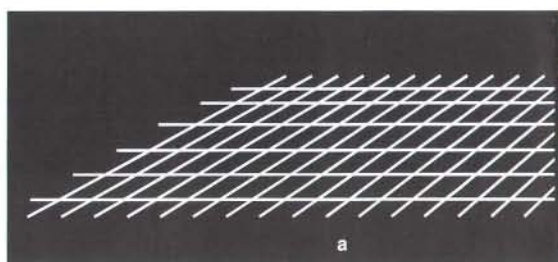
Het zal niemand verbazen dat de theorie van Kaluza en Klein een wedergeboorte beleeft in de Supersnaartheorie, met name het idee van compactificatie. Het blijkt dat de Supersnaartheorie inderdaad consistent geformuleerd kan worden op een tiendimensionale ruimte met zes compacte dimensies. Een aantrekkelijk aspect van deze compactificatie is dat een aantal van de overmaat van massalozes toestanden een massa krijgt. Hiermee ontstaat een effectief vierdimensionale theorie die erg lijkt op de eerdergenoemde Hogere-Unificatietheorie. Men kan zich afvragen waarom zes extra ruimtelijke dimensies uit de Supersnaartheorie compact zijn. Sommige natuurkundigen zoeken naar een antwoord in de kosmologie en proberen een dynamische oorzaak aan te wijzen voor de opringing van zes dimensies of, wat ook tot de mogelijkheden behoort, de *uitrolling* van drie dimensies, tijdens de eerste 10^{-40} seconde van het zeer jonge heelal. Een algemeen aanvaard antwoord is er nog niet; voorlopig is een vierdimensionale niet-compacte ruimte-tijd een kwestie van fenomenologie, zoals overigens in alle andere fysische theorieën het geval is; we nemen de wereld om ons heen in die vorm waar.

Snaarwisselwerkingen

Tot op dit moment hebben we alleen gesproken over *vrije* snaren, terwijl een ander ultiem doel van de supersnaartheorie (dan alle elementaire deeltjes met hun eigenschappen genereren), de

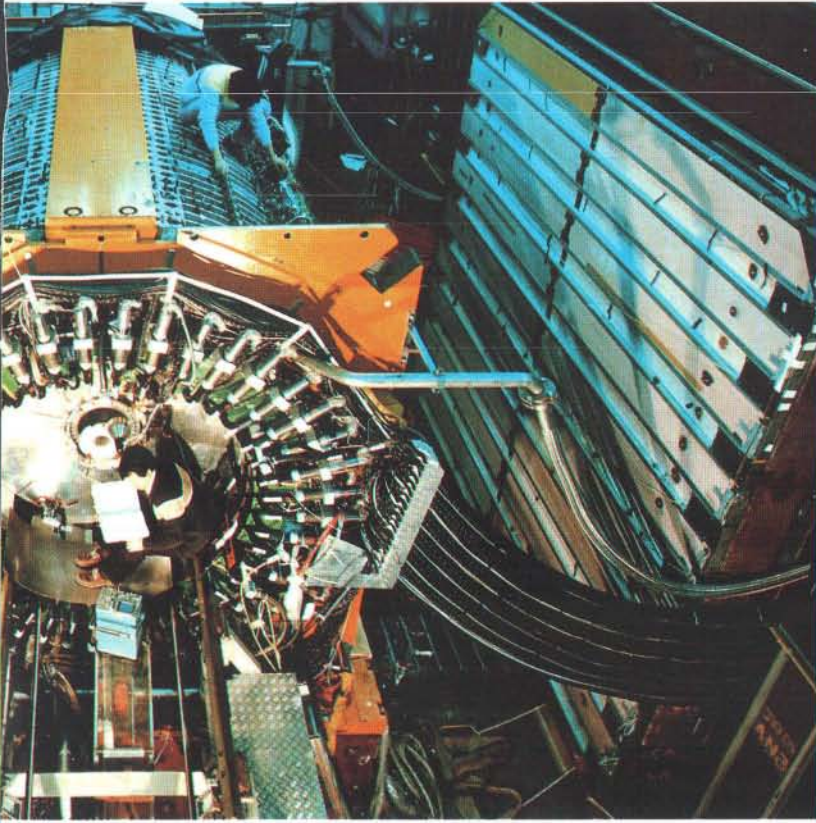


18



19

unificatie is van de vier wisselwerkingen. Twee snaren wisselwerken door zich samen te voegen tot één snaar, die zich weer kan splitsen in twee snaren. De Supersnaartheorie beschrijft bijvoorbeeld de elektromagnetische wisselwerking tussen twee elektronen als volgt: twee snaren in een quantumtoestand die correspondeert met het elektron, de *elektron-toestand*, kunnen een snaar in de *foton-toestand* uitwisselen. De impuls- en energie-overdracht tussen



18. Met behulp van moderne deeltjesversnellers is de grens van het waarneembare verschoven naar 10^{-17} mm. Daarvoor is een energie nodig in de orde van 10^9 GeV. De unificatie van de vier wisselwerkingen kunnen we pas waarnemen bij een energie ter grootte van 10^{14} GeV.

19. In de supersnaartheorie is sprake van meer dan drie ruimtelijke dimensies. Volgens de theorie nemen we niet meer dan drie dimensies waar, doordat de overige dimensies door middel van compactificatie zijn opgerold. Een speciaal geval van compactificatie is het oprollen van een plat vlak (a) via een oneindig lange cilindermantel (b) tot een zwemband (c).



b



c

de elektronen is de globale impuls- en energie-overdracht tussen de zwaartepunten van de snaren; de splitsing van een snaar in de elektron-toestand tot een snaar in de foton-toestand en een snaar in de elektron-toestand, is niets anders dan een verandering van quantumtoestand van de snaren. (afb. 20.) Door snaren in verschillende quantumtoestanden te beschouwen, zijn alle wisselwerkingen te behandelen.

De potentiële energie (elektromagnetische energie) van een elektron is volgens de Klassieke Elektrodynamica: $U_{\text{pot}} = k e r^{-1}$. Dus de elektromagnetische energie van een elektron in $r=0$ is *oneindig*. Dat valt moeilijk te rijmen met de eindige massa van het elektron. In de quantumelektrodynamica echter, is deze energie van een elektron *eindig*, omdat men daar de parameters van de theorie kan renormeren (renormaliseren). In het algemeen heet een theo-

rie waarin men door renormering kan voorkomen dat de berekende fysische grootheden oneindig worden, renormeerbaar. De kracht van het Standaardmodel is gelegen in het feit dat het een renormeerbare theorie is. Alle voorgestelde theorieën voor quantumgravitatie blijken niet renormeerbaar — dat is de eerder genoemde rots waar de theoretische natuurkunde haar tanden op stuk heeft gebeten. Bij supersnaren ligt dit echter anders.

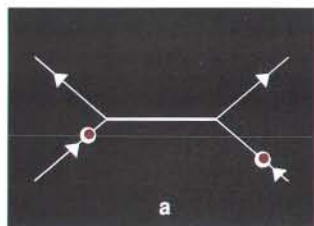
Het blijkt dat snaarwisselwerkingen zich wiskundig veel mooier gedragen dan deeltjeswisselwerkingen. Daarom hoeft men bij de berekening van fysische grootheden in snaartheorie niet te renormaliseren. Het blijkt dat de corresponderende berekeningen voor snaartheorieën die tot nog zijn gedaan, waarbij ook de zwaartekracht quantummechanisch wordt beschreven, eindige resultaten opleveren. Toen dat in 1985 bekend werd, was de opmars der supersnaren niet meer te stuiten. Maar deze mars vindt niet alleen jubelende massa's op haar weg.

De snaarcontroverse

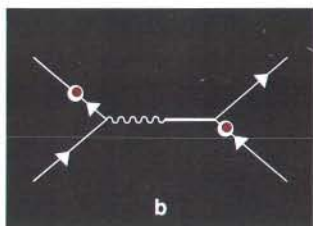
Richard Feynman heeft over de Supersnaartheorie gezegd: "Ik heb sterk het gevoel dat het nonsens is." En Sheldon Glashow: "Het slechte nieuws is dat jarenlange krachtsinspanningen van de beste en briljantste fysici niet één verificerbare voorspelling hebben opgeleverd en er wordt er ook niet één in de nabije toekomst verwacht. De Supersnaartheorie wordt 'de nieuwe

natuurkunde' genoemd door haar voorstanders, maar het is niet eens bekend hoe het oude, gevestigde Standaardmodel erin past." Daarentegen heeft Steven Weinberg gezegd: "De Supersnaartheorie lijkt mij een verschrikkelijk goed idee en alle aandacht alleszins waard." En David Gross: "Het is zeer opmerkelijk hoe gemakkelijk herkenbare kenmerken van de natuurkunde tevoorschijn komen uit supersnaren. Hoewel ik niet geloof dat we de juiste weg al hebben gevonden, lijken er geen onoverkomelijke hindernissen te zijn om alle bekende natuurkunde af te leiden uit de heterotische supersnaar."

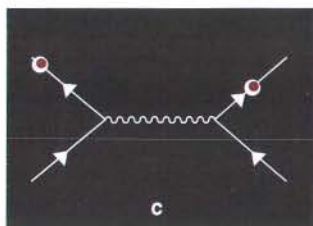
Zonder twijfel zijn supersnaren het meest controversiële onderwerp uit de hedendaagse theoretische natuurkunde. Het is waar dat de Supersnaartheorie vooralsnog niet één verificerbare voorspelling heeft opgeleverd. De reusachtige supergeleidende deeltjesversneller die momenteel in de Verenigde Staten wordt gebouwd, kan experimenten uitvoeren met een energie van 10^4 GeV, waarschijnlijk het maximaal haalbare dat ooit in aardse experimenten zal worden bereikt. De Supersnaartheorie begint interessant te worden bij 10^{19} GeV, zodat er een onoverbrugbare kloof lijkt te gapen tussen theorie en experiment. Deze kloof is evenwel niet van principiële maar van praktische aard. Bovendien is het op de voorhand niet uitgesloten dat de Supersnaartheorie voorspellingen doet over verschijnselen die zich voordoen in een meer haalbaar energiebereik. Het is ook



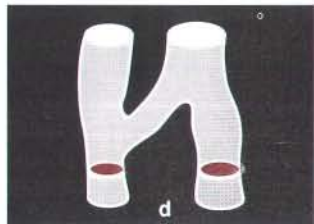
a



b



c



d



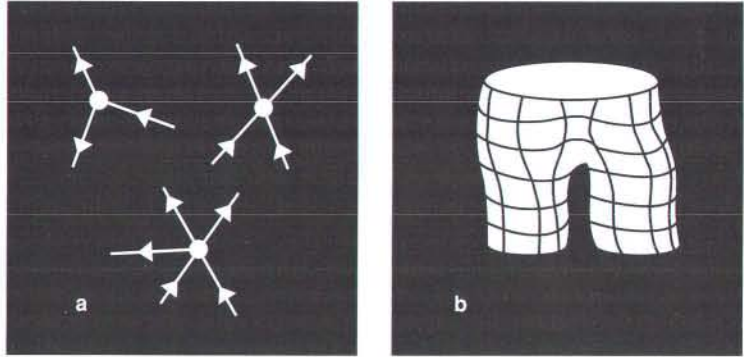
e



f

20. We zien hier hoe twee puntdeeltjes wisselwerken door middel van uitwisseling van een deeltje (a t/m c). Een snaarwisselwerking kunnen we op een soortgelijke wijze weergeven.

21. Feynmandiagrammen van wisselwerkingen tussen puntdeeltjes zijn opgebouwd uit takken (a). Als we de takken vervangen door snaren, gaat zo'n diagram op een broek lijken (b).



21

waar dat het Standaardmodel nog niet als een speciale, laag-energetische versie van een supersnaartheorie is op te vatten. Maar wel is het zo dat alle fysische bestanddelen van het Standaardmodel (ijksymmetrieën, de fysische kenmerken van elementaire deeltjes) allemaal op de supersnaar aanwezig zijn. Bovendien is het zo dat niet alleen in Princeton supersnaren worden gemaakt, in fysische keukens overal ter wereld bereiden theoretische natuurkundigen supersnaartheorieën. In feite raken we bedolven onder een rijkdom aan bestanddelen en overweldigd door een veelheid aan kookboeken. Misschien is in deze culinaire beeldspraak het Standaardmodel niet meer dan een eenvoudige lifflafje waarvan we de ingrediënten noch het recept kunnen vinden. Terwijl in het restaurant

de experimentatoren voor een leeg bord op de menukaart zitten te kauwen, heerst er in de keuken een koortsachtige bedrijvigheid die op zeer uiteenlopende gebieden in de wis- en natuurkunde tot exquise gerechten heeft geleid. De theoretische fysica beleeft in ieder geval een zeer vruchtbare episode. En het is op voorhand niet uit te sluiten dat de dag aanbreekt waarop er voor de experimentatoren een copieuze maaltijd wordt geserveerd.

Of het universum een gigantische symfonie is van supersnaren die zich delen en samenvoegen, weten wij op dit moment niet. Wat wij wel weten op dit moment, is dat alleen supersnaren een uitzicht bieden op quantumgravitatie en wellicht op het Utopia van een Volledige-Unificatietheorie.

Literatuur

- Green M. Superstrings. Scientific American 1986; 9.
Sörensen B. Supersnaren — Een theorie over alles en niets. Amsterdam: Contact, 1989. ISBN 9025467504.
Kaku M, Trainer J. Beyond Einstein. Toronto: Bantam Books, 1987. ISBN 0553343491.
Davies PCW, Brown J. Superstrings. A theory of everything? Cambridge: Cambridge University Press, 1988. ISBN 0521354625.
Green M, Schwarz J, Witten E. Superstring theory. (2 delen). Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
Peat DF. Superstrings and the search for the theory of everything. London: Scribners, 1991. ISBN 0-356-18842-6.

Bronvermelding illustraties

- Bicron European Office, Bodegraven: pag. 672-673.
Spaarnestad Fotoarchief, Haarlem: 1.
Tom Hutchins/Transworld Features, Haarlem: 4.
Bildarchiv Preussischer Kulturbesitz: 5.
Jeremy Burgess/Joël-SPL, Amsterdam: 7.
Constantine Manos: 9 (uit: Pierce JR. Klank en muziek. Maastricht: Natuur & Techniek, Wetenschappelijke Bibliotheek, 1983).
ESO, Garching, D: 10, 17.
Manfred P Kage, Institut für wissenschaftliche Fotografie, Lauterstein, D: 11.
Matrices, Amsterdam: 14.
Scientific American New York, VS: 13.
Scienze & Tecnica, Milaan, I: 16.
DESY, Hamburg, D: 18.
De overige afbeeldingen zijn afkomstig van de auteurs.

LEDRUKKEN I

HET BEGIN VAN HET GETAL



Peter Damerow
Max-Planck-Institut für Bildungsforschung,
Berlijn

Robert K. Englund en Hans J. Nissen
Freie Universität Berlin

W K L E L



Zo'n 5000 jaar geleden ontstonden de eerste geschreven documenten. Mesopotamiërs bewerkten klompjes vochtige klei met een stompe en een scherpe griffel, om daarop ondermeer bezittingen, oogstopbrengsten en recepten vast te leggen. De teksten bevatten vrijwel allemaal veel aantalsaanduidingen en zijn daarom nog steeds belangrijke documenten, die ons kunnen leren hoe de mensheid met getallen leerde omgaan.

Doordat we er al jong mee leren werken is het omgaan met getallen ons zeer vertrouwd en vinden we rekenen heel gewoon. We kunnen ons dan ook nauwelijks voorstellen wat voor geestelijke krachttoer het betekende, om de aanduiding van een aantal los te koppelen van het getelde object zelf. Die stap is niet zo vanzelfsprekend, zoals onlangs is aangetoond door onderzoek bij natuurvolkers die nog niet bleken te beschikken over abstracte getallen zoals wij die kennen. Archeologen hebben daar nooit rekening mee gehouden en gingen bij de interpretatie van de oudste ons bekende, geschreven documenten – afkomstig uit Mesopotamië en zo'n vijfduizend jaar oud – steeds uit van het bestaan van zo'n getalbegrip.

De oudste geschreven documenten van Voor-Azië zijn kleitabletten waarop in de nog vochtige klei tekens werden gegrift of gedrukt. Bijna al de 4500 tabletten en fragmenten die we nu kennen, werden gevonden tijdens opgravingen in Uruk, een eertijds grote, welvarende stad in het tegenwoordige woestijngebied van zuid-Irak. Sinds 1912 onderzochten Duitse archeologen deze stad. Hun werk werd slechts onderbroken door de beide Wereldoorlogen en is sinds de aanloop naar de Golfoorlog voorlopig aan zijn einde gekomen. Uruk is meer dan vijfduizend jaar — tot in de eerste eeuwen na Christus — continu bewoond geweest, al waren er ook toen turbulente perioden.

De meeste kleitabletten werden in het centrum gevonden, maar vondsten in andere delen van de stad tonen aan dat het gebruik van schrift niet beperkt was tot de binnenstad.

Lange tijd gingen archeologen er vanuit dat de mens al een abstract getalbegrip had voordat

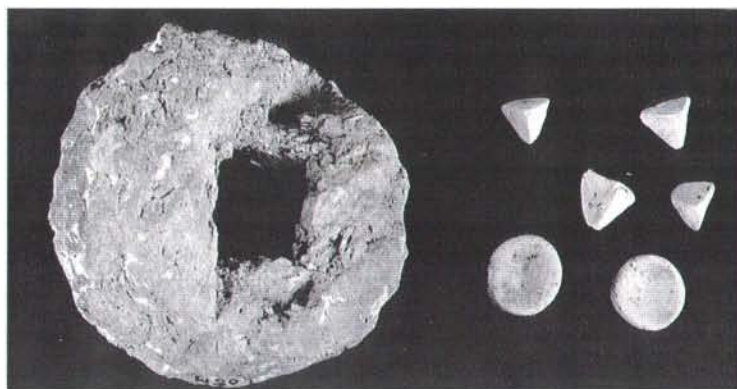
die het schrift beheerste. De ontcijfering van de kleitabletten uit Uruk geeft echter aanleiding om deze vooronderstelling in twijfel te trekken. In de tijd waaruit de oudste documenten dateren, werden getalsaanduidingen strikt *voorwerp-specifiek* gebruikt. Een groot aantal ervan is zelfs voor meer dan één uitleg vatbaar; dat wil zeggen dat de numerieke waarde die een aanduiding vertegenwoordigt, verandert naar gelang haar toepassing.

De Mesopotamiërs hadden drieduizend jaar voor Christus al grotendeels de stap gezet van de symbolische weergave van een hoeveelheid voorwerpen naar een puur abstracte aanduiding van het aantal. In zoverre belichten de getalsaanduidingen in de kleitabletten ook een belangrijk stadium in de ontwikkeling van de kennis en het begripsvermogen (de *cognitieve ontwikkeling*) van de mens.

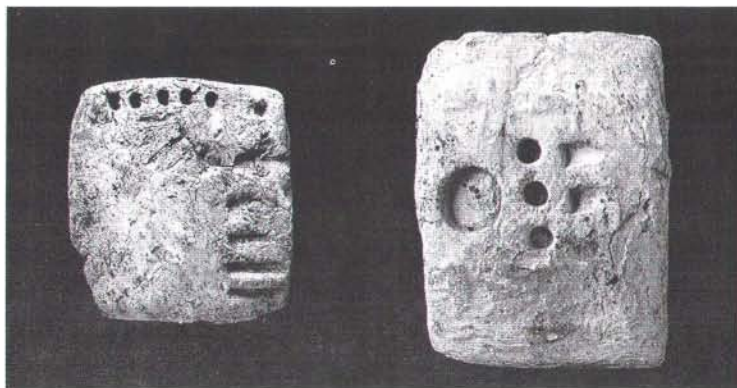
Berlijnse onderzoekers werken aan de ontcijfering van deze documenten en de recon-

1. Uit de periode vlak voor het schrift zijn intrede deed, stammen onvervalsbaare 'documenten' zoals deze holle bal van klei. De bal was gevuld met een aantal telstenen en verzegeld met stempelindrukken. Uit de telstenen hebben zich later de getaltekens van het archaische schrift ontwikkeld.

2. Als onmiddellijke voorloper van het schrift komen kleitabletten met getalindrukken (links) ten tonele. Ze bevatten geen andere tekens en de indrukken zijn nog niet volgens vaste regels geordend. Iets later verschijnen tabletten met naast de getaltekens ook sporen van stempelindrukken. De ordening van de 'getallen' komt hier reeds overeen met de later gebruikelijke systemen.



1



2

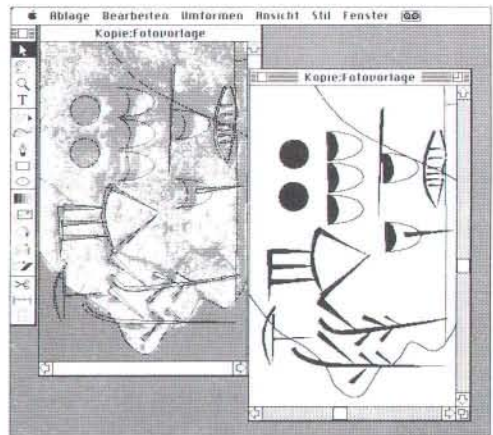
structie van deze fase in de cognitieve ontwikkeling. De getalsaanduidingen staan daarbij sinds kort in het centrum van de belangstelling. De oude teksten bevatten zo'n 1200 tekens en varianten daarvan. Daarvan springen de ongeveer zestig getalsaanduidingen al direct in het oog vanwege hun schrijfwijze. Meestal werden ze niet — zoals de overige tekens — met een scherpe griffel in het oppervlak van kleitabletten gekrast, maar werden ze daar met een ronde griffel diep ingedrukt en dan gedeeltelijk met de spitse griffel van markeringen voorzien.

Aangezien de archaische teksten grotendeels administratieve documenten zijn, behoren getalsaanduidingen tot de belangrijkste schrifttekens daarin. Omdat deze teksten het karakter hebben van een boekhouding, vertegenwoordigen de getalsaanduidingen tevens een belangrijke informatiebron. Het ligt dan ook voor de hand dat archeologen bij de ontcijfering bijzondere aandacht besteden aan deze tekens.

Regels voor het gebruik van de tekens

Voor onze analyse gebruikten wij, de groep Berlijnse onderzoekers, een werkwijze die fundamenteel afwijkt van de tot nog toe gebruikelijke methoden. Men heeft tot nu toe steeds geprobeerd om uit de weinige teksten die complete berekeningen bevatten, zo rechtstreeks mogelijk de betekenis van getalsaanduidingen af te leiden. De op die manier ontdekte waarden gebruikte men vervolgens voor de interpretatie van teksten waaruit de rekenkundige betekenis niet direct viel af te leiden. In plaats van zo rechtstreeks naar deze numerieke waarde te zoeken, probeerden wij eerst zoveel mogelijk te weten te komen over de wetmatigheden die ten grondslag lagen aan het gebruik van de tekens, zonder ons om de betekenis te bekommeren.

Daarbij bleken de honderden, uit elke denkbare context geraakte en daardoor schijnbaar betekenisloze scherven met getalsaanduidingen, plotseling zeer waardevol. Onze methode om uit die fragmenten regels te reconstrueren voor het gebruik van de getalsaanduidingen, is te vergelijken met een computerspelletje. Iedere regel die we ontdekten of vermoedden werd met behulp van de computer direct op de hele tekst getoetst. Hoeveel voorbeelden waren er te vinden, die de regel onderschreven? Hoeveel uitzonderingen waren er en hoeveel voorbeelden die tegen de regel indruisten?



3. Met behulp van een computer kunnen de Berlijnse onderzoekers de indrukken in een kleitablet 'overtrekken' en aldus herleiden tot eenduidige grafische tekens (rechter venster van

deze schermafbeelding). Dat doen zij vanaf een foto van het tablet, die zij met een scanner inlezen. Ook bij het achterhalen van de betekenis speelt de computer een onmisbare rol.

De meerduidigheid van de tekens die in het verleden zo dikwijls tot irritatie had geleid, stoorde daarbij nauwelijks, omdat we alleen de regels voor het tekengebruik en niet de betekenis van de tekens zelf onderzochten.

Voor het weergeven van hoeveelheden met archaische getalsaanduidingen blijken drie zeer algemene regels kenmerkend. We noemen die respectievelijk de correspondentie-, de vervangings- en de volgorde-regel, en zullen ze hier in het kort bespreken voordat we ons gaan bezighouden met de specifiekere regels.

Volgens de *correspondentie*-regel worden hoeveelheden voorgesteld door een herhaling van bepaalde tekens. Daarbij wordt het teken voor de tel- of meeteenheid net zo dikwijls herhaald, als de betreffende eenheid in de te tellen of te meten hoeveelheid is vervat. Dat gebeurt echter alleen tot een bepaalde, van de context afhankelijke, limiet. Overschrijdt de weer te geven hoeveelheid deze limiet, dan vervangt een teken van hogere waarde steeds een vast aantal herhalingen van het teken met lagere waarde: de *vervangings*-regel. Daarbij wordt het teken met de hogere waarde zelf als eenheid behandeld en overeenkomstig de correspondentieregel indien nodig herhaald.

De *volgorde*-regel tenslotte, bepaalt dat de tekens in een getalsaanduiding steeds in de

De inhoud van de teksten

Bijna alle notities uit Uruk beginnen met een variërend aantal indrukken, die gemakkelijk als getalsaanduidingen waren te identificeren. Ook latere teksten met aantekeningen over economische feiten beginnen zo en daarmee was bewezen dat het merendeel van de oudste tabletten economische documenten betrof.

Sommige teksten vallen buiten dit bestek, doordat iedere notitie met een merkteken begint. Maar ook daarvoor bestaan equivalenten in latere teksten: zogenaamde *lexicale lijsten* sommen achter elkaar inhoudelijk of formeel bij elkaar behorende begrippen

op, soms ingeleid door een '1'. Deze lijsten vormen optellingen van voorwerpen van hout (namen van bomen) of metaal, dieren (onderscheiden naar geslacht) of namen van steden. Belangrijk voor ons begrip van de toenmalige maatschappij is een lijst met de titels en functie-omschrijvingen van het toenmalige bestuursapparaat in hiërarchische volgorde.

Verreweg de meeste tabletten bevatten echter gegevens die in het dagelijks leven noodzakelijk zijn voor een overzicht van het economische verkeer. Door middel van steekwoorden worden goederen en hun hoeveelheden aangeduid, en wordt vermeld wie

4 en 5. De toepassing van diverse getalsystemen voor verschillende zaken is karakteristiek voor de notatie van aantallen op de archaische kleitabletten. Op afbeelding 4 staan (in het vak rechtsboven) in een 60-talig stelsel 1223 (2×600 , 2×10 en 3×1) eenheden van een onbekend geïteproduct genoteerd. In het vak daaronder zijn in een 120-talig stelsel 18 120 (2×7200 , 3×1200 en 1×120) eenheden van een melkproduct geboekt. Het andere tekstfragment (5) is onderdeel van een tablet met gegevens over veldarealen en graanoogsten. Op de voorzijde (5a) is in het zogenaamde GAN-systeem een oppervlak genoteerd dat ongeveer 260 hectare omvat. Op deze zijde stonden vermoedelijk meer van zulke areaalopgaven, samen met oogstopbrengsten. Op de achterzijde (5b) is de som van deze opbrengsten grotendeels bewaard gebleven. Zij staat in het SE-systeem, dat speciaal voor oogsten in gebruik was. De totale oogst omvat 180 161 ($3 \times 54\ 000$, 2×9000 , 5×30 , 2×5 en 1×1) eenheden van een inhoudsmaat van ongeveer vier liter (dus ruim 720 000 l). Het beheer van dergelijke hoeveelheden, die de jaarproductie van een enkel dorp verre overtreffen, speelde vermoedelijk een beslissende rol in de vroege ontwikkeling van het rekenkundige denken.



volgorde van hun rangorde (waarde) worden opgeschreven, te beginnen met het teken met de hoogste waarde.

Deze regels zijn al lang algemeen bekend en zo voor de hand liggend, dat een nader onderzoek ervan niet de moeite waard leek. Wanneer men de tekens als symbolen voor getallen beschouwt, werken de regels als kader van een systeem voor de getalsaanduiding immers heel bevredigend. Wanneer bijvoorbeeld een bepaald teken de 1 en een ander de 6 voorstelde, kon het eerste teken noodzakelijkerwijs niet meer dan vijf keer voorkomen.

Maar er zijn ook andere oplossingen denkbaar. Het eerste teken zou bijvoorbeeld een kleine maatbeker voor kunnen stellen en het tweede een grotere, met het zesvoudige volume. Ook dan is het verklaarbaar waarom het kleinere teken slechts vijf keer voorkwam.

Wij hielden ons aanvankelijk niet met zulke problemen bezig en gingen in plaats daarvan voor verschillende toepassingsgebieden na hoe vaak de afzonderlijke tekens maximaal herhaald werden. Daaruit leidden wij de respectieve waarde van het meerduidige teken af en ontdekten dat die afhankelijk was van de context.

betrokken was bij een transactie of deze controleerde. De elementen die voor een lopende tekst vereist zouden zijn, ontbreken. Daaruit blijkt dat het schrift aanvankelijk ongeschikt was om op andere dan strikt economische terreinen te gebruiken.

Verder onderzoek maakt aannemelijk dat de toenmalige economische systemen uitgebreide en steeds ingewikkelder controlemogelijkheden vereisten. Zowel de inhoud als het gebruik van het schrift laten zien dat dit naar alle waarschijnlijkheid ontstond om problemen bij de controle van het economische verkeer het hoofd te bieden.



I-1

I-1. Lexicale lijsten sommen allerlei samenhangende begrippen op. Dit is een fragment uit zo'n lijst, waarin een lange reeks vaten of kannen met een bepaalde inhoud (vermoedelijk diverse soorten bier) wordt opgevoerd. De begrippen worden hier alle voorafgegaan door het teken voor '1', een indruk met een stompe griffel.



5a



b



6

6. Een blik over het opgravinggebied in Uruk, waar het oudst bekende schrift werd gevonden. Uit die stad stammen bijna alle archaische kleitabletten. Uruk lag dicht bij de rivier de Eufraat in het huidige Zuid-Irak en werd van vijfduizend jaar voor onze jaartelling tot kort daarna bewoond.

Optellingen

Het is betrekkelijk eenvoudig om de 'waarde' van een teken vast te stellen, als we te maken hebben met een optelling waarbij dit teken een bepaald aantal tekens met lagere waarde vervangt. Tekst W 20676,2 (afb. 7) bevat bijvoorbeeld op de achterzijde de som van de beide boekingen van de voorzijde. De berekening luidt als volgt:

$$1 \bullet 7 \text{ D} + 5 \text{ D} = 2 \bullet 2 \text{ D}$$

Daaruit valt af te leiden dat tien D's door één \bullet worden vervangen ofwel: $1 \bullet = 10 \text{ D}$.

Het is echter niet gemakkelijk vast te stellen in hoeverre deze resultaten algemeen geldig zijn. Want de oude getalsaanduidingen werden in principe zo gebruikt dat ze op verschillende momenten een verschillende rekenkundige waarde hebben. Zo bevat tekst W 15897,c21 (afb. 8) de optelling

$$3 \text{ D} + 3 \text{ D} + 3 \text{ D} + 3 \text{ D} = 2 \bullet$$

Volgens het voorbeeld hierboven zou als uitkomst $1 \bullet 2 \text{ D}$ te verwachten zijn. De som $2 \bullet$ betekent dat het teken \bullet in deze context niet de tienvoudige maar slechts de zesvoudige waarde van het teken D vertegenwoordigt.

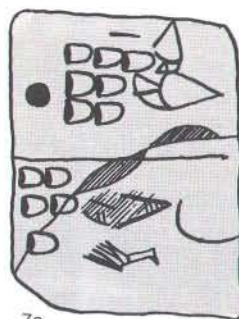
Maar het is niet alleen de met de context variërende rekenkundige betekenis van de getalsaanduidingen die ervoor zorgt dat de optellingen niet altijd zo eenvoudig te ontcijferen zijn als in de voorbeelden hierboven. Wanneer een groter aantal ingewikkelde getallen wordt opgeteld en evenredig veelvoudige vervangingsbewerkingen worden uitgevoerd, lijkt zo'n som op een ingewikkeld getallenraadsel. Dat kan niet zelden op meer dan één manier worden opgelost.

Uit de optelling in tekst ATU 1 Nr. 311 (afb. 9) is bijvoorbeeld alleen de volgende vergelijking af te leiden:

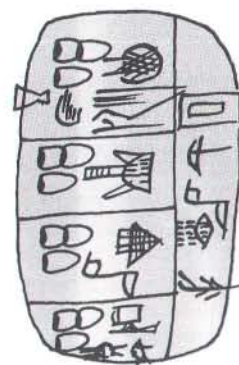
$$1 \text{ } \text{ } + 1 \text{ } + 4 \text{ } = 1 \text{ D}$$

Deze vergelijking bevat vier onbekenden en is daardoor op talrijke manieren op te lossen. In dit geval is met enig geluk echter toch nog de verhouding tussen de tekens te achterhalen. Zo is uit de wijze van noteren de rangorde van de tekens af te leiden. Verder weten we dat de ge-

7 en 8. Rekenkundige dubbelzinnigheid is een van de merkwaardigste eigenschappen van de getaltekens in de oudste geschreven documenten. Zoals de afgebeelde teksten bewijzen, veranderen deze tekens met het bereik waarop hun rekenkundige betekenis wordt toegepast. Bij beide teksten is op de achterzijde de som genoteerd van wat op de voorzijde staat geboekt. Op het bovenste tablet, waarop bierkroezen vermeld staan, worden 17 en 5 eenheden opgeteld. Het resultaat is dus 22 eenheden. De rechte indruk (stip) heeft hier de tienvoudige betekenis van het teken voor één eenheid. In de onderste tekst worden viermaal 3 eenheden van een onbekend graanproduct opgeteld. De som (12 eenheden) wordt weergegeven met twee stippen, die hier dus 6 eenheden vertegenwoordigen.



7a

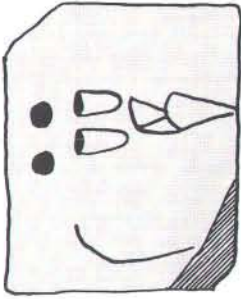


8a

talsaanduidingen met hogere waarde in de regel hele veelvouden vertegenwoordigen van tekens met lagere waarde. Tenslotte moet wegens de drievoudige herhaling van het teken $\text{ } \text{ }$ op het tablet het teken $\text{ } \text{ }$ minstens de viervoudige waarde hebben. Op grond van al die voorwaarden is er maar één oplossing mogelijk:

$$\begin{aligned} 1 \text{ D} &= 2 \text{ } \text{ } \\ 1 \text{ } \text{ } &= 2 \text{ } \text{ } \\ 1 \text{ } \text{ } &= 4 \text{ } \text{ } \end{aligned}$$

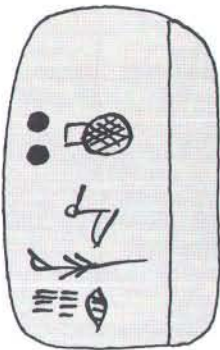
In het algemeen zijn de mogelijkheden om de waarde van de getalsaanduidingen in optellingen te bepalen echter beperkt. Dat is alleen al om de eenvoudige reden dat slechts op enkele van de archaische teksten optellingen voorkomen. Van die paar optellingen is bovendien nog hooguit een fractie gaaf genoeg om alle opgetelde getallen te ontcijferen. Het is echter ook mogelijk om met statistische methoden conclusies te trekken omtrent de waarde van de tekens (zie Intermezzo II). Op die manier kan men



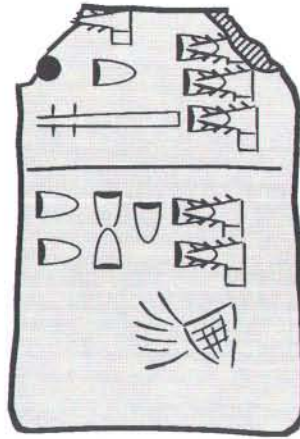
b

9. Vaak kunnen uit berekeningen die diverse algebraïsche oplossingen kennen, de grootteverhoudingen tussen de tekens worden opgehelderd met behulp van vrij voor de hand liggende aannamen. Dat mag blijken uit dit tablet, waarvan de tekens tot het archaische EN-systeem konden worden herleid. De tekst ATU 1 Nr.311 bevat een optelling die als vergelijking met vier onbekenden vele oplossingen kent. Uit de volgorde van de te-

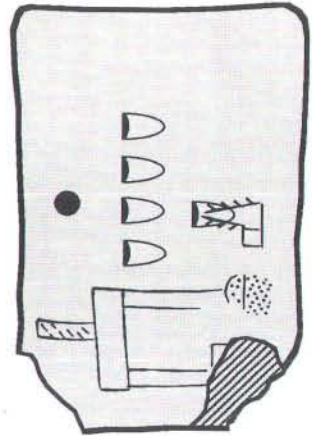
kens kunnen we echter de grootte van de getallen opmaken. Verder kunnen we er redelijkerwijs van uitgaan dat de hogere tekens steeds hele veelvouden van de lagere tekens zijn. Tenslotte geeft het grootste aantal herhalingen van een teken aan hoe groot de waarde van het eerstvolgende hogere teken ten minste moet zijn. Met deze aannamen geven de tekens hun onderlinge samenhang langs algebraïsche weg eenduidig prijs.



b



9a



9b

systematisch controleren in hoeverre de resultaten die een afzonderlijke sleuteltekst heeft opgeleverd, algemeen bruikbaar zijn. Het was vooral zo ingewikkeld om uit de meer dan 6500 bekende getalsaanduidingen regels te destilleren voor het gebruik ervan, omdat een eenmalige gebeurtenis slechts zelden verstreckende conclusies toelaat. Pas naarmate het werk vorderde voegden de verschillende elementen zich geleidelijk samen tot een consistent geheel.

Getalsystemen met specifieke toepassingsgebieden

De gevonden regels voor het gebruik van de tekens kwamen in grote lijnen overeen met de gangbare betekenis die aan getalwaarden wordt toegeschreven. Daarnaast vonden we echter ook regels die afweken van de gebruikelijke interpretatie van de tekens als getalsaanduidingen van een uniform systeem.

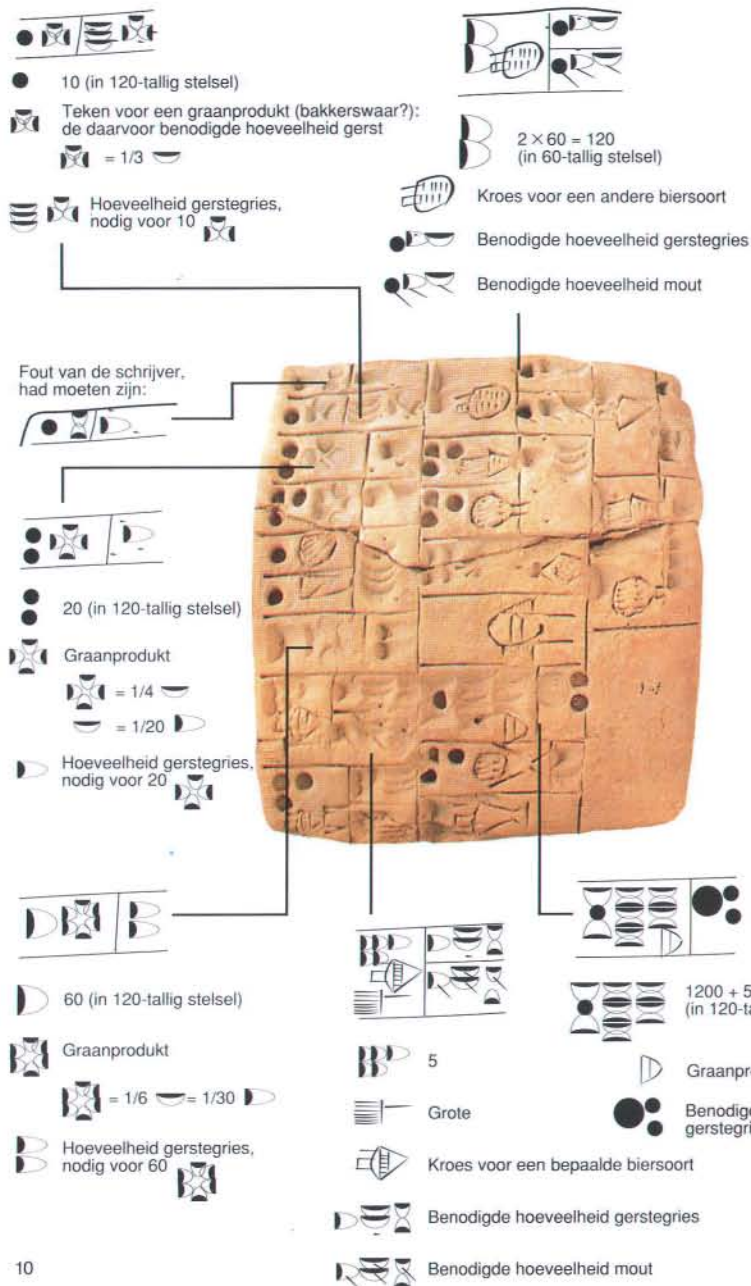
Zo zijn er drie tekens waaraan men de getalwaarde 60, 120 en 600 toeschrijft. We ontdek-

ten nu de eigenaardige regel dat de tekens voor 120 en 600 nooit samen in een tekstnotatie voorkomen. Wanneer het teken voor 120 voorkomt, komt het soms meer dan vijf maal voor, zonder dat het wordt vervangen door het teken voor 600. Bevat een getalsaanduiding daarentegen het teken voor 600, dan wordt het teken voor 60 eveneens vaker herhaald en niet door het teken voor 120 vervangen.

Deze en soortgelijke verrassingen konden door het totaalresultaat van ons gepuzzel worden verklaard. We ontdekten dat de meer dan 6500 getalsaanduidingen bijna volledig onder te brengen waren in een aantal verschillende getalsystemen, waarin dezelfde tekens voor een deel heel verschillende numerieke waarden hebben. Zo komen de tekens voor 120 en 600 eenvoudig nooit samen voor omdat ze tot verschillende getalsystemen behoren. Een nadere analyse toonde aan dat de verschillende systemen, enkele uitzonderingen daargelaten, zeer strikt van elkaar afgegrensde toepassingsgebieden kennen.

10. Dit circa 5000 jaar oude tablet bevat in proto-spijkerschrift recepten voor diverse graanprodukten, waaronder enkele soorten bier. Zoals gebruikelijk in die tijd worden voor verschillende produkten verschillende getalsystemen

gebruikt. Zo was voor telbare graanprodukten een 120-tallig stelsel in gebruik en voor bier een 60-tallig stelsel. Daarnaast komen in het tablet nog drie varianten voor van een systeem gebaseerd op inhoudsmaten.



Statistiek

Een experiment, gebaseerd op de waarschijnlijkheidsleer, kan misschien de mogelijkheid verduidelijken om langs statistische weg numerieke waarden te bepalen. Er bestaan niet alleen dobbelstenen met zes vlakken, maar ze kunnen bijvoorbeeld ook de vorm hebben van een tetraëder met maar vier vlakken. Laten we aannemen dat iemand ons de opeenvolgende worpen van zijn dobbelsteen meedeelt, zonder ons te vertellen hoeveel vlakken de steen heeft. Aanvankelijk weten we vrijwel niets over het aantal vlakken. Alleen zou duidelijk zijn, dat dat minstens zo groot moet zijn als het hoogste geworpen getal. Met iedere worp zou het echter onwaarschijnlijker wor-

II-1. De statistiek levert verreweg de krachtigste methode voor de ontcijfering van getaltekens. Terwijl er slechts enkele tabletten zijn met eenduidig begrepen optellingen, kan het totale tekstmateriaal aan een statistische analyse worden onderworpen. Als voorbeeld van wat dergelijke analyse opleveren, tonen we hier het statistische bewijs

den dat niet ook het hoogste getal een keer geworpen werd, en tenslotte zouden we met aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid weten hoeveel vlakken de dobbelsteen in werkelijkheid heeft.

De getalsaanduidingen in archaische teksten zijn op soortgelijke wijze te beschouwen als informatie-dragers van de waarde van de gebruikte tekens. Ieder fragment waarop een bepaald teken wordt herhaald, geeft bijvoorbeeld opheldering over het feit hoe dikwijls dat teken in een bepaalde context minimaal kan worden herhaald. Met ieder fragment neemt tegelijkertijd de waarschijnlijkheid toe, dat het maximale aantal ook werkelijk een keer voorkomt.

Deze overweging levert bijvoorbeeld een eenvoudig statistisch bewijs voor het feit dat de traditionele veronderstelling, dat er in Mesopotamië naast een sexagesimaal stelsel aanvankelijk een concurrerend decimaal stelsel heeft bestaan, onjuist is. We krijgen op die manier een betrouwbare en objectieve bevestiging van de ontdekking dat een van de meest voorkomende getalsaanduidingen afhankelijk van het toepassingsgebied nu eens de waarde 6, dan de waarde 10 aanneemt. Het sexagesimale systeem berust op de waardeverhoudingen:

$$10 \text{ D} = \bullet \text{ en } 6 \bullet = \text{D}$$

Voor het veronderstelde decimale systeem zouden

dat de waarde van het teken \bullet afhankelijk is van waarop het van toepassing is. In het 60-tallige systeem gelden de relaties $1 \bullet = 10 \text{ D}$ en $1 \text{ D} = 6 \bullet$. In dit systeem kan het teken \bullet dus hooguit vijfmaal worden herhaald. Toch bestaat er een hele reeks tabletten waarop het teken meer dan vijfmaal in een groep voor-

komt. Blijkens een statistische analyse, waarvan dit staafdiagram de resultaten toont, komt in al die gevallen het opvolgende lagere teken D , dat in het sexagesimale systeem tot negemaal herhaald wordt, nooit meer dan vijfmaal voor. De kans dat dit op toeval berust is kleiner dan 0,0002. In dit zogenaamde SE-sys-

daarentegen de volgende waardeverhoudingen moeten gelden:

$$10 \text{ D} = \bullet \text{ en } 10 \bullet = \bullet$$

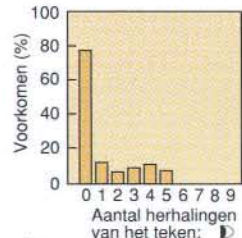
Wordt in een getalsaanduiding het teken \bullet meer dan vijfmaal herhaald, zonder dat het door het eerstvolgende teken met hogere waarde wordt vervangen, dan kan deze getalsaanduiding niet tot het sexagesimale systeem behoren.

Dat betekent echter niet dat die daardoor direct een decimaal systeem belichaamt. De statistiek weerlegt deze overhaaste conclusie. De vermelde verzameling van alle archaische teksten uit Uruk en Djemdet Nasr geeft 46 getalsaanduidingen die het teken \bullet meer dan vijfvoudig herhaald en tegelijkertijd het teken D vertonen; bij geen daarvan is D meer dan vijf keer herhaald (zie afb. II-1). De statistische waarschijnlijkheid dat dit het resultaat van toeval is, bedraagt slechts 0,02 procent.

De statistiek pleit dus tegen de waardeverhouding van een decimaal systeem. Zij suggereert eerder waardeverhoudingen van een systeem dat we vanwege het feit dat het wordt gebruikt voor graantransacties (weergegeven door het teken SE) als het SE-systeem hebben aangeduid:

$$6 \text{ D} = \bullet \text{ en } 10 \bullet = \bullet$$

teem, dat hoofdzakelijk voor graan in gebruik was, geldt dus $1 \bullet = 6 \text{ D}$ (en $1 \bullet = 10 \bullet$). Dat in teksten met een meer dan vijfvoudige herhaling van het teken \bullet het teken D vrij vaak ontbreekt, zien we als een trend om bij voorkeur ronde getallen te gebruiken.



II-1

Het ontbreken van een abstract getalbegrip

Na het bovenstaande rijst natuurlijk de vraag in welke zin men deze rekenkundige notaties eigenlijk kan beschouwen als aanduidingen van 'getallen'. Ze hebben immers gecompliceerde en gedeeltelijk aan een specifieke inhoud gebonden regels voor het gebruik, kennen allerlei nevenbetekenissen en hun functie als reken-eenheid of als symbool voor een concreet object is niet altijd duidelijk begrensd. Welke ont-

wikkelingsfase vertegenwoordigen zij in een cultuur die duizend jaar later als eerste een hoog ontwikkelde wiskunde voortbracht?

Onze analyse van de archaische getalsaanduidingen en de regels voor het gebruik ervan weerlegt de opvatting dat de tekens voor abstracte getallen stonden. Weliswaar werden vaak dezelfde tekens gebruikt, maar als symbool van een ander getalsysteem hebben zij steeds een andere rekenkundige betekenis. Is er een theoretisch alternatief voor een interpreta-

tie van de tekens als getalsaanwijdingen? De Gestaltpsycholoog Max Wertheimer heeft al in 1912 zeer precies het psychologische karakter beschreven van rekenkundige prestaties vóór de ontwikkeling van een abstract getalbegrip. Aan de hand van onderzoeksverslagen over natuurvolkeren postuleerde hij psychologische structuren die hij *getalsanalogia* noemde. Ze blijven weliswaar gebonden aan een bepaalde concrete inhoud en zijn in zoverre minder abstract dan onze getallen, maar dienen wel voor overeenkomstige doeleinden.

Er is inmiddels zeer veel onderzoek dat Wertheimers veronderstellingen bevestigt. Volgens dit onderzoek kennen veel ongetletterde culturen een groot aantal contextgebonden, proto-rekenkundige technieken, die noch een abstract getalbegrip veronderstellen, noch dit noodzakelijkerwijs tot gevolg hebben.

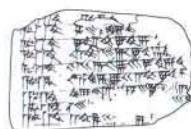
De door ons geanalyseerde archaische rekenstelsels kunnen zeer goed worden vergeleken met zulke proto-rekenkundige technieken. Zo duiden de tekens geen getallen aan maar eenheden. De vier werd dus niet voorgesteld door een teken zoals onze '4', maar juist natuurkundig door een viervoudige herhaling van het teken voor de betreffende eenheid.

Dat betekent dat er geen formeel verschil bestond tussen de weergave van objecten en die van getallen. Men kon daardoor de regels voor het gebruik van de systemen voor getalsaanwijdingen ook toepassen op de proto-rekenkundige aanduiding, waarin de vier herhaalde tekens de vier voorgestelde objecten vertegenwoordigden en niet het getal vier.

In de schriftloze culturen ontbreken niet alleen bepaalde vormen van abstract denken, maar ook de problemen en de rekenkundige technieken waarbij die zich zouden kunnen manifesteren. In de culturen waarin daarentegen een vorm van schrift werd gebruikt, trof men beide tot nog toe altijd tegelijkertijd aan. De vraag of tussen beide stadia een culturele ontwikkeling plaatsvond of slechts de *epigenetische*, dat wil zeggen de biologisch vastgelegde ontplooiing van een universele structuur van het menselijk denken, bleef onderwerp van tegenstrijdige speculaties.

De systemen voor getalsaanwijdingen in de archaische teksten leveren nu de ontbrekende schakel: daarmee is bewezen dat de ontwikkeling van de grondbeginselen van rekenkundig denken cultureel bepaald is.

VOORBEELD



EVCLIDIS
ELEMENTORVM
LIBRI XV

11. Het abstracte getalbegrip is het resultaat van een lang ontwikkelingsproces, waarin de uitvinding van het schrift een belangrijke gebeurtenis was. Uitgangspunt van de ontwikkeling was de stuk-voor-stuktoekenning van symbolen aan objecten. Gestandaardiseerde 'teilmiddelen' maakten die toekenning tot een gemeenschappelijk gebruik. Met de uitvinding van het schrift

Wanneer we ervan uitgaan dat daardoor met zekerheid een bepaalde fase in de ontwikkeling is te dateren, kunnen we proberen de bewaard gebleven bewijzen van het oude rekenkundige denken opnieuw te interpreteren. Dan ontstaat in grote lijnen het volgende totaalbeeld van een ontwikkeling die uitmondde in het abstracte getalbegrip (afb. 11). De eerste archeologische bewijzen die duiden op een systeem van relaties tussen voorwerpen en getsymbolen in de meest algemene betekenis, vinden we al in het Laat Paleolithicum (ongeveer 40 000 tot 10 000 jaar v. Chr.). De gebruikte getsymbolen zijn echter nog nauwelijks systematisch gestructureerd, wat voor een operationeel gebruik van de symbolen noodzakelijk is.

Op deze pre-operationele fase in de ontwikkeling van het getalbegrip volgt een proto-rekenkundige fase, waarin voor het eerst regels betreffende de symbolische weergave van hoeveelheden worden opgesteld. Parallel daaraan ontstonden op cognitief gebied *getalsanalogia*.

Vermoedelijk vormde de zogenaamde agrarische revolutie — de overgang naar systemati-

FASEN IN DE ONTWIKKELING VAN HET GETALBEGRIJP	TIJD EN CULTUUR
Pre-operationele fase Eerste plaatsing van gelijksoortige, relatief abstracte symbolen bij objecten, echter zonder systematische structuur.	Circa 40 000 tot 10 000 v. Chr. Laat-Paleolithicum
Proto-rekenkundige fase Vastleggen van hoeveelheden met behulp van een eenduidig verband tussen objecten en symbolen. Overlevering van symboolsystemen. Hogere eenheden ontstaan door bundeling.	Na circa 10 000 v. Chr. Schriftloze culturen met vaste woonplaatsen
Archaïsche rekenkunde Ontwikkelde rekenkundige technieken, maar zonder dat er sprake was van contextonafhankelijke 'getalaanduidingen'.	Circa 3200 v. Chr. Na de ontwikkeling van het schrift
Primaire rekenkunde Universele getalafbeeldingen en expliciete rekenkunde, maar geen getalbegrip onafhankelijk van de afbeelding van de getallen. Er is geen begripsvorming die wijst op het gebruik van getallen als denkbeeldige objecten.	Na circa 3000 v. Chr. Vroege hoogontwikkelde culturen
Abstract getalbegrip Begrippen die het bestaan van getallen als denkbeeldige objecten verraden. Definiëring van getallen en bewijs van getaleigenschappen.	Na circa 500 v. Chr. Oude Grieken

konden met 'getaltekens' aantallen gemakkelijk worden genoteerd, waarbij de tekens aanvankelijk nog sterk met de getelde objecten bleven verbonden. Geleidelijk werden getallen steeds zelfstandiger, abstracte begrippen. Uiteindelijk leidde de schriftelijke definitie van getallen en hun eigenschappen tot een tweedeling tussen de getalafbeeldingen en het getalbegrip.

sche landbouw en veehouderij — de basis van deze verdere ontwikkeling. Daardoor werd het immers noodzakelijk de voorraden op peil te houden en de arbeidsverdeling te organiseren. In het Nabije Oosten valt de periode waarvoor men het gebruik van getalssymbolen heeft kunnen aantonen, inderdaad ongeveer samen met de periode waarin de nomadische levenswijze werd verruild voor een vaste woonplaats, en landbouw en veeteelt zich sterk uitbreidden.

De analyse van de getalssystemen uit de oude teksten van Mesopotamië verschaft ons een momentopname van de overgang van deze proto-rekenkunde naar de rekenkunde in engere zin. In korte tijd gaan de eigenaardige kenmerken van het archaïsche getalssystemen verloren en niet veel later dan drieduizend jaar voor Christus ontwikkelt zich de context-onafhankelijke, 'primaire' rekenkunde. Evenals in andere antieke, hoogstaande culturen wordt deze ontwikkeling gedragen door de bestuursambtenaren van de staatsbureaucratie en door de schrijversscholen waarin zij werden opgeleid.

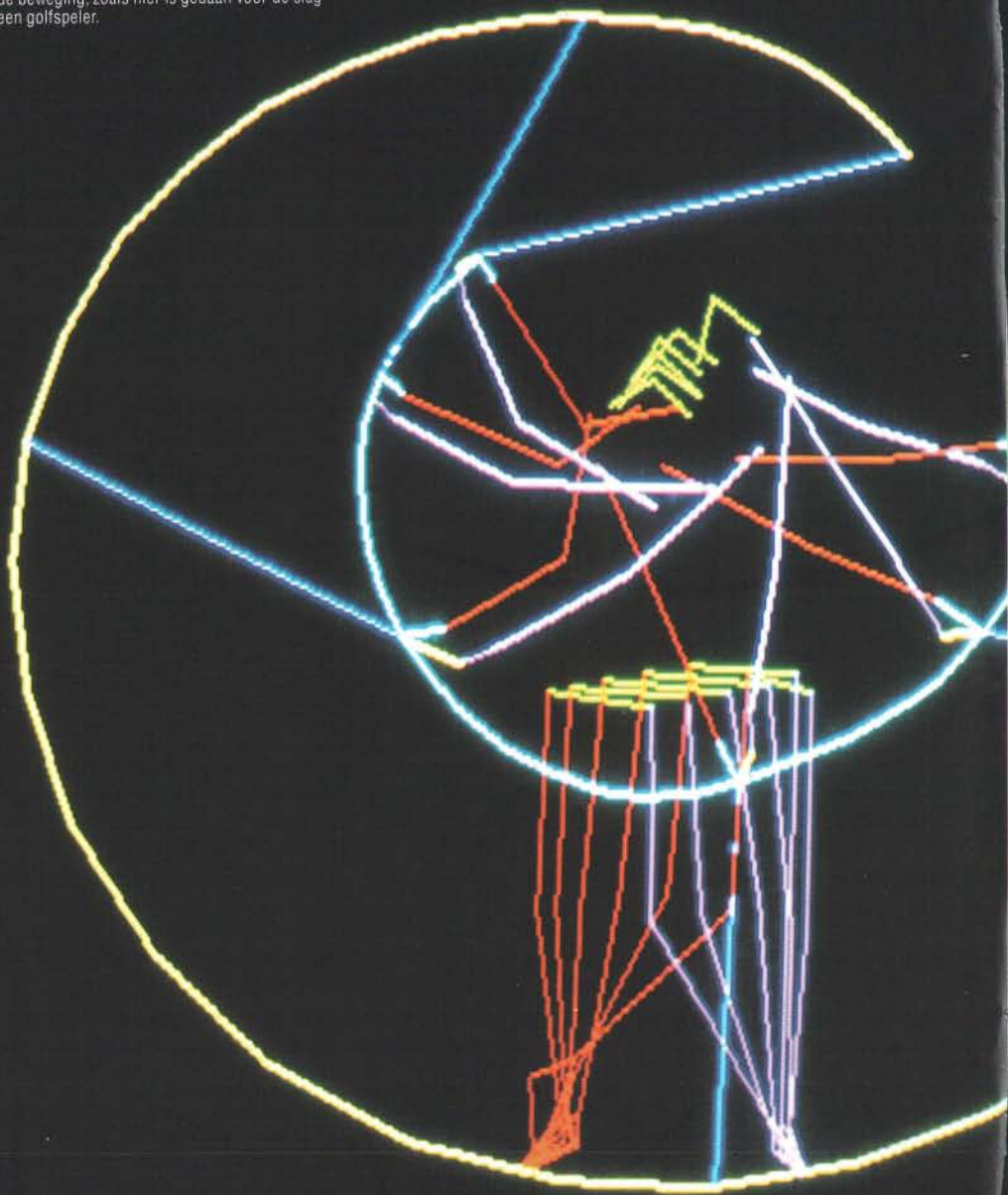
Het is echter nog een lange weg van deze primaire rekenkunde naar het abstracte getal. De Babylonische wiskunde, die uit de Mesopotamische traditie voortkwam en ongeveer 1500 jaar na de uitvinding van het schrift voor het eerst tot bloei kwam, kende definities noch bewijzen; er bestond zelfs geen woord dat vergelijkbaar was met ons woord 'getal'. Het lijkt erop dat de eerste uitspraken over objecten die slechts in de menselijke geest bestaan — en daarmee de ontwikkeling van het getalbegrip — voorbehouden zijn gebleven aan de oude Grieken.

Dit artikel verscheen eerder in het Duitse maandblad *Spektrum der Wissenschaft*. Het werd voor ons vertaald door mevrouw drs C. Sykora uit Wageningen.

Bronvermelding illustraties

De afbeeldingen bij dit artikel zijn afkomstig van mevrouw M. Nissen (pag. 696/697, 1 en 2), van *Spektrum der Wissenschaft* (4 en 5), van mevrouw K. Englund (6) en van de auteurs.

Merktekens op een proefpersoon (inzettfoto) of een ander bewegend voorwerp markeren de punten waarvan de ruimtelijke beweging wordt geregistreerd. Bij dit onderzoek naar grijpgedrag werden actieve merktekens toegepast, die een computer volautomatisch kan verwerken. Lijntjes verbinden de afzonderlijke punten van een bewegingsregistratie tot 'stick-figuurtjes', die vanuit elke richting kunnen worden bekeken. Enkele opeenvolgende figuurtjes in één afbeelding geven een schetsmatige reconstructie van de beweging, zoals hier is gedaan voor de slag van een golfspeler.



R

DRIEDIMENSIONALE

Theo de Haan
Amsterdam

eliëf

IN PLATTE BEELDEN



Wat gebeurt er precies tijdens de afzetsfase van een hoogspringer? Hoe verandert het bewegingspatroon van een patiënt als gevolg van een bepaalde therapie? Wat is de meest efficiënte manier van rolstoelvoortbeweging? Hoe gedraagt de kreukelzone van een auto zich bij een niet-frontale botsing? Bij de beantwoording van al deze vragen kunnen film- of video-opnamen een belangrijke dienst bewijzen. In slow-motion kunnen de beelden op het oog (kwalitatief) worden geanalyseerd. De opnamen zijn echter ook geschikt voor kwantitatief onderzoek. Hiervoor is het nodig om voor een reeks van tijdstippen de ruimtelijke, driedimensionale, posities van de bewegende objecten te kennen. Film en video leveren weliswaar een tweedimensionaal beeld van de werkelijkheid, maar met moderne omreken-technieken is het mogelijk om uit deze platte registraties weer snel een nauwkeurig, ruimtelijk beeld te reconstrueren.

BEWEGINGSREGISTRATIE

Het Wembley stadion, 30 juli 1966. De finale van het WK voetbal tussen Engeland en West-Duitsland eindigt na een opwindende strijd met een gelijke stand (2-2). Een verlenging moet de beslissing brengen. Er zijn tien minuten van de extra speeltijd verstreken wanneer de Engelsman Ball met een loepzuivere voorzet ploeggenoot Hurst bereikt. Deze haalt met volle kracht uit in de richting van het Duitse doel. De bal knalt tegen de onderkant van de lat, schiet vrijwel recht naar beneden en stuitert het veld weer in. De Duitsers halen opgelucht adem. Hun opluchting slaat echter om in verbijstering als ze bemerken dat de scheidsrechter het doelpunt toekent: 3-2. De Duitsers komen deze schok niet meer te boven en verliezen de wedstrijd uiteindelijk met 4-2.

Dat derde Engelse doelpunt is tot op heden zonder twijfel het meest omstreden doelpunt uit de voetbalgeschiedenis. De discussie laat af en toe weer op en nog altijd zijn er (Duitse) voetballiefhebbers die beweren dat de bal het doelvlak niet geheel heeft gepasseerd. Bestudering van de filmbeelden heeft geen eenduidig antwoord opgeleverd.

Tegenwoordig zouden enkele eenvoudige hulpmiddelen volstaan om in dit soort situaties snel uitsluitsel te kunnen geven. Dat kan bij gebruik van een driedimensionale (3D) registratietechniek. Een dergelijke manier van registreren, waarbij de diepte-informatie van een situatie niet verloren gaat, is natuurlijk niet alleen van nut bij het beoordelen van kritische momenten in sportwedstrijden. 3D-registraties zijn ook van belang in de industrie (bijvoorbeeld bij de sturing en controle van robotarmen), in de wetenschap (bijvoorbeeld bij fundamenteel onderzoek van het menselijk bewegen) en in de geneeskunde (bijvoorbeeld bij het evalueren van revalidatieprocessen). Wat komt er zoal kijken bij een 3D-registratietechniek?

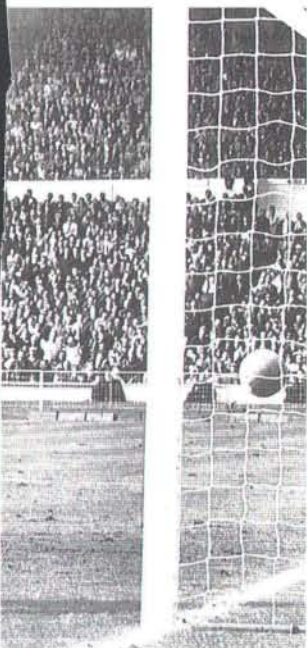
Diepte zien

Ons beeld van de buitenwereld wordt in het oog op het netvlies geprojecteerd. Het is daarbij geen overbodige luxe dat we over twee ogen beschikken, die elk hun eigen beeld vormen. Het verschil tussen de projecties van beide ogen is weliswaar gering, maar stelt ons toch in staat om diepte te zien. Hierdoor kunnen we bijvoorbeeld snel vaststellen of een door de lucht bewegend voorwerp naar ons toekomt of zich



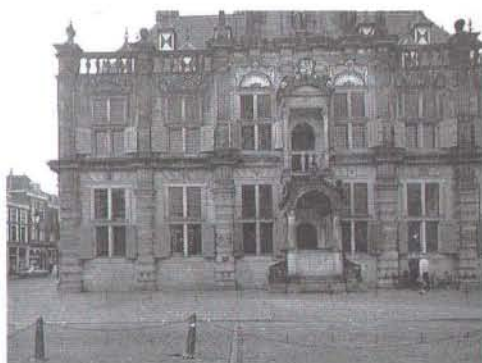
juist van ons verwijderd. Met slechts één oog zouden we dit moeten afleiden uit het groter of kleiner worden van de projectie die het voorwerp op het netvlies veroorzaakt. Dit is vooral bij voorwerpen die zich op grote afstand bevinden of die slechts langzaam bewegen geen eenvoudige klus. Voetballiefhebbers die een wedstrijd op de televisie volgen zullen in dit verband wellicht bekend zijn met het volgende effect: Vanuit een scrimmage vliegt de bal door de lucht. Hij lijkt precies voor het doel terecht te komen, maar als hij op de grond stuit, blijkt dat hij zich juist van het doel af heeft bewogen. Het gezichtsbedrog kon ontstaan doordat een camera, evenals een enkel oog, een tweedimensionaal (2D) registratiesysteem is.

Als iemand ingewikkelde bewegingen wil bestuderen, moet die dus tenminste twee camera's benutten om de diepte-informatie niet te verliezen. Bij kwalitatieve analyses — als hij bijvoorbeeld wil weten of een voorwerp zich naar voor of naar achteren beweegt — houdt het verhaal hier op. Bij kwantitatieve analyses — bijvoorbeeld bij nauwkeurige plaatsbepalingen als functie van de tijd, om uit de beelden de krachten te berekenen die op het bewegende voorwerp werken — is het nodig om uit twee (of



1. In de WK-finale van 1966 komt Engeland op een 3-2 voorsprong tegen Duitsland door een doelpunt van Geoff Hurst. Zelfs nu zijn er nog stemmen die beweren dat de bal, die hier juist vanaf de lat naar beneden stuit, nooit over de lijn is geweest.

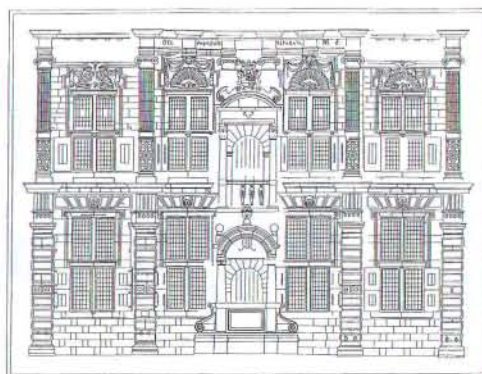
2 en 3. Met behulp van een speciale meetcamera werden deze twee foto's (2) van het Delftse stadhuis gemaakt. Daarbij werd ook het reliëf van de gevel vastgelegd. De foto's bevatten voldoende informatie om de voorgevel van het gebouw met behulp van een CAD-programma nauwkeurig in kaart te brengen (3). De tekening doet dienst bij de ruimtelijke beschrijving van het monument.



2a



b



3

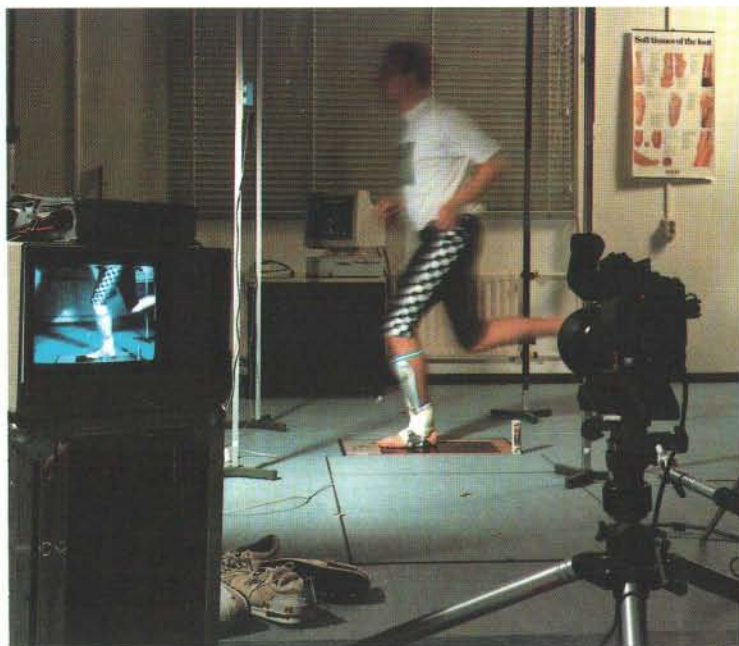
meer) 2D-cameraregistraties een driedimensionaal beeld samen te stellen. Dat vereist een aantal bewerkingen.

Eerst moet degene die een ruimtelijk beeld wil verkrijgen nagaan welke punten in de opnamen voor de beweging van belang zijn. Dat kunnen bijvoorbeeld scharniergewrichten zijn, het middelpunt van een bal of de laspunt aan een robotarm. Voor elk beeldje moeten de posities van deze punten (de 2D-positiegegevens) worden vastgelegd. Deze bewerking staat bekend als het digitaliseren van de opnamen. Vervolgens moeten uit de opnamen van de verschillende camera's steeds de beeldjes die met één bepaald tijdstip corresponderen, bij elkaar worden genomen. Door op de 2D-positiegegevens van deze beeldjes een omrekentechniek toe te passen, kunnen voor dat bepaalde tijdstip de ruimtelijke (3D) coördinaten van de gedigitaliseerde punten worden gereconstrueerd.

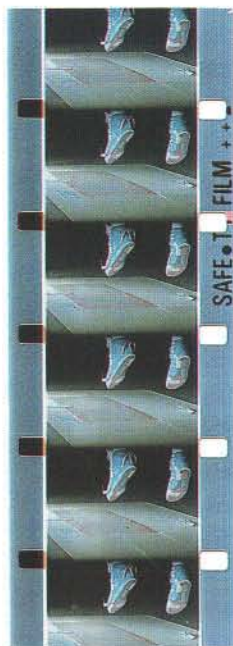
Alvorens een beschrijving te geven van zo'n omrekentechniek, eerst wat meer over verschillende digitaliseermethodes.

Film

Het meest gebruikte medium voor de bestudering van bewegingen is 16mm-film. Er is een aantal goede redenen voor deze populariteit. Eén daarvan is dat voor film reeds lange tijd zogenaamde high-speedcamera's beschikbaar zijn waarmee zeer veel beeldjes per seconde kunnen worden vastgelegd. Een hoge beeldfrequentie (high-speed camera's halen vaak wel vijfhonderd beeldjes per seconde) is noodzake-



4



5

lijk om snelle bewegingen in detail te kunnen bestuderen. Als bijkomstig voordeel voorkomt de korte belichtingstijd (die het gevolg is van een hoge beeldfrequentie) het optreden van bewegingsonscherpte. Nog een reden voor de populariteit van 16mm-film is het hoge oplossend vermogen van de opnamen. Op een beeldje zijn, afhankelijk van de lichtgevoeligheid van de film, vijftig tot honderd lijnen per millimeter te onderscheiden.

Het digitaliseren van filmopnamen is een handmatig proces. De opnamen dienen beeldje voor beeldje op een scherm te worden geprojecteerd. Op ieder beeldje moet de beeldanalist de punten die van belang zijn met een speciale pen of muis aanwijzen. Een op het aanwijsapparaat aangesloten computer registreert de posities (de xy-coördinaten) van de aangewezen punten en slaat ze op voor later gebruik.

Voor een driedimensionale reconstructie is het van belang dat duidelijk blijft welke beeldjes van de verschillende opnamen bij één bepaald tijdstip horen. Omdat een high-speedcamera de snelheid waarmee die opnamen maakt mechanisch regelt, is het zeer moeilijk om verschillende high-speedcamera's synchroon te laten lopen. Met behulp van tijdens de opnamen

4 en 5. Twee TNO-instituten voerden onderzoek uit naar de rol die sportschoenen spelen bij het ontstaan en voorkomen van hardloopleessures. Daartoe werden high-speedfilmbeelden (5) nauwgezet geanalyseerd.

6. Dankzij een spiegel kan één camera in deze opstelling beelden vanuit twee gezichtspunten maken. Spiegelopnamen zijn alleen mogelijk wanneer het onderwerp zich nauwelijks verplaatst. Daarom vindt dit onderzoek naar de meest efficiënte manier van rolstoelvoorbeweging plaats op een trottoir-roulant.

7. Computer-assisted training heet een methode waarmee atleten hun prestaties kunnen verbeteren. Zij krijgen daarbij zeer gedetailleerde aanwijzingen naar aanleiding van hun bewegingspatroon. Hier digitaliseert de beeldanalist van de Amerikaanse olympische ploeg enkele filmbeelden.



6

geregistreerde gebeurtenissen (bijvoorbeeld het flitsen van een flitslicht) kunnen echter tijdens de analyse synchronisatiefouten worden gecorrigeerd.

Het synchronisatieprobleem laat zich soms oplossen door gebruik te maken van een spiegel. Er is daarbij slechts één camera in gebruik. De film uit deze camera vertoont op ieder beeldje twee gelijktijdige projecties vanuit verschillende hoeken, namelijk de rechtstreekse projectie en de projectie via de spiegel.

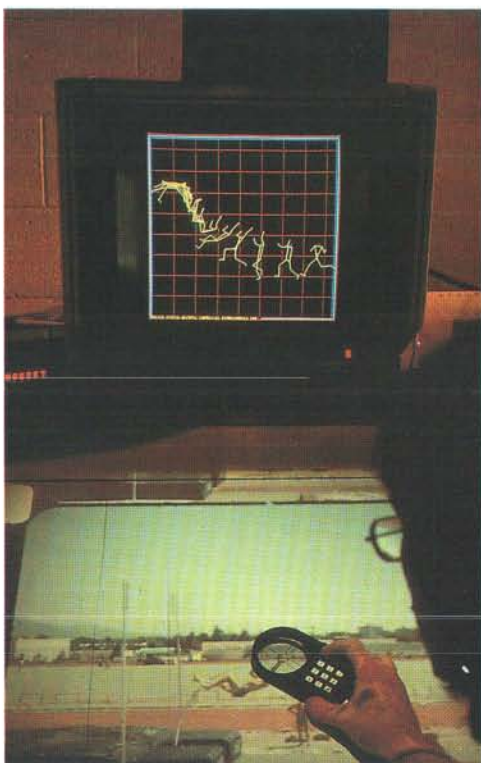
Video

Video heeft in het gebruik een aantal aantrekkelijke voordelen boven film: bij een videoband is ontwikkelen overbodig, de kwaliteit van de beelden kan tijdens de opname worden gecontroleerd en bijgesteld en synchronisatie van verschillende opnamen is langs elektronische weg vrij simpel. Toch stond video, als het ging om bewegingsregistraties, tot voor kort in de schaduw van film. Dit kwam door het lage oplos-

send vermogen en vooral ook door de lage beeldfrequentie. Een standaardvideocamera legt vijftig beeldjes per seconde vast, wat overeenkomt met een tijdsspanne van twintig milliseconden per beeldje. Dit is veel te weinig om bijvoorbeeld de afzetfase van een sprinter (ca. 120 ms) nauwkeurig te bestuderen of de contactfase tussen club en bal bij een golfslag (minder dan 10 ms) duidelijk in beeld te brengen.

Recente ontwikkelingen op het gebied van de videotechnologie hebben er echter toe geleid dat er nu niet alleen een hogere resolutie binnen bereik is, maar ook dat er nu high-speedvideocamera's zijn. Een bepaalde groep van die camera's, die gebruik maakt van standaard-VHS-bandjes, haalt inmiddels 400 beelden per seconde. Door dergelijke ontwikkelingen vormt video tegenwoordig een goed alternatief voor film.

Voor het digitaliseren van video-opnamen zijn twee methodes in gebruik: de *overlay*-methode of de *frame-grab*-methode. Bij de overlaymethode zorgt een apparaat dat een vi-



deobeeld en een computerbeeld kan mengen, een zogenaamde *genlock*, ervoor dat het beeld van een computer over het videobeeld heen wordt 'gelegd'. De *genlock* definieert het computerbeeld in dit geval als 'doorzichtig'; alleen een aanwijspijl die met een muis over het scherm bewogen kan worden, verschijnt in kleur. Door het transparante computerscherm is het videobeeld te zien. Op elk stilstaand videobeeldje kunnen vervolgens de xy-coördinaten van de punten die van belang zijn worden vastgelegd door ze aan te wijzen met de muis van de computer. De computer slaat die punten vervolgens op in zijn geheugen en kan er later berekeningen mee uitvoeren.

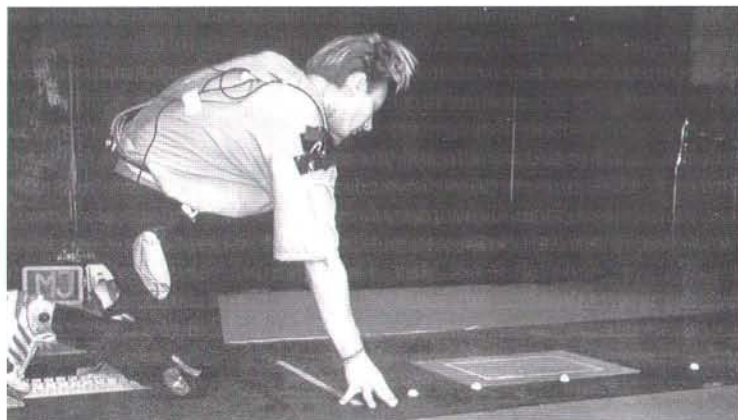
De overlaymethode is meestal eenvoudig te realiseren. Een nadeel is echter dat de meeste videorecorders steeds twee opvolgende beelden gebruiken om één stilstaand beeld te produceren. De beeldfrequentie wordt daardoor gehalveerd.

Dit probleem kan gemakkelijk worden omzeild met behulp van een frame-grabber, een voorziening die een videobeeldje direct kan doorsluizen naar het geheugen van een computer. Eenmaal ingelezen kan de beeldanalist het beeldje, net als bij de overlaymethode, handmatig digitaliseren met de muis. Een bijkomend voordeel van de frame-grabmethode is dat, voorafgaand aan het feitelijke digitaliseren, speciale computerprogramma's de kwaliteit van het ingelezen beeldje kunnen verbeteren. Ieder beeldpunt (pixel) bevindt zich nu immers in het geheugen van de computer en die kan ze dus elk afzonderlijk bewerken.

Automatische systemen

Het grote belang van video is gelegen in het feit dat dit medium de deur opent naar (semi-)automatische digitaliseersystemen. Als een frame-grabber de beeldjes heeft ingelezen in het geheugen van een computer kan men bijvoorbeeld de computer op de beeldjes laten zoeken naar de punten die voor de beweging van belang zijn. De punten dienen zich dan wel door duidelijke merktekens van hun omgeving te onderscheiden. Meestal fungeren kleine reflectoren als *passief* merktekens; ze weerkaatsen het licht van enkele felle lampen. Nadat eerst de punten en de volgorde waarin ze geregistreerd moeten worden met behulp van de muis aan de computer kenbaar zijn gemaakt, kan het digitaliseren van de beeldjes verder automatisch verlopen. Dat wil zeggen, zolang het niet voorkomt dat een merkteken even onzichtbaar is of dat twee merktekens elkaar kruisen. In zulke gevallen ontstaat er voor de computer namelijk een identificatieprobleem. Dit is slechts te verhelpen door de registratievolgorde van de merktekens opnieuw in te voeren.

Het identificatieprobleem treedt niet op bij zogenaamde opto-elektrische systemen. De merktekens bij deze technisch geavanceerde systemen zijn LED's (light emitting diodes), die in een vastgelegde volgorde één voor één een zeer korte, infrarode lichtflits afgeven. Speciale camera's registreren direct de posities van deze *actieve* merktekens en slaan die op in het geheugen van de computer waaraan ze zijn gekoppeld. Het grote voordeel van opto-elektri-



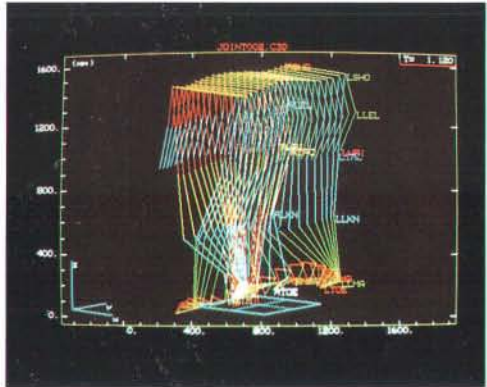
8. Een sprinter beplakt met merktekens maakt een modelstart voor de camera. De merktekens kunnen niet op de kleding van de sportman worden bevestigd; ze zouden dan ten opzichte van zijn lichaam kunnen verschuiven. Het referentiefraam bestaat hier uit vaste merktekens op de vloer en op de achterwand van de zaal.



9

9 en 10. Cerebrale parese, een lichte verlamming die bij de geboorte ontstaat, kan worden vastgesteld uit het 3D-bewegingspatroon van de patiënt (buiging van de knie, draaiing van de en-

kel, staplengte en dergelijke als functie van de tijd). De totale beweging kan in de vorm van opeenvolgende stickfiguurtjes vanuit elke willekeurige hoek worden bekeken.



10

sche systemen is dat het digitaliseren volautomatisch geschiedt. Het werken met actieve merktekens heeft echter als nadeel dat de lampjes altijd via een draadje met een voeding verbonden moeten zijn, wat grote beperkingen aan de bewegingsvrijheid oplegt.

Van 2D naar 3D

Laten we nu eens bekijken hoe uit 2D-registraties een 3D-beeld te reconstrueren is. Stel dat twee camera's de bewegingen van een voorwerp registreren. De ene camera beschouwt het voorwerp van voren, waardoor bewegingen van boven naar beneden en van links naar rechts goed te zien zijn. De andere camera bekijkt het voorwerp van opzij, waardoor ook bewegingen naar voor en naar achter en wederom die van boven naar beneden worden vastgelegd. De vraag is nu welke ruimtelijke afstanden overeenkomen met een verschuiving van het voorwerp op de projecties.

Voor een cameralens die op oneindig is scherpgesteld geldt een eenvoudige vergelijking (zie Intermezzo): de verhouding tussen de grootte van een voorwerp en de grootte van zijn projectie is gelijk aan de verhouding tussen de

voorwerpsafstand en de brandpuntsafstand. De grootte van de projectie kan in de opname worden opgemeten. Ook de brandpuntsafstand van de cameralens kan worden bepaald. De grootte van het voorwerp en de afstand van het voorwerp tot de lens, die samen de ruimtelijke informatie vormen waarnaar we op zoek zijn, zijn nu de enige twee onbekenden in deze lineaire vergelijking. De wiskunde schrijft voor dat er een stelsel van n onafhankelijke, lineaire vergelijkingen nodig is om van de n onbekenden in dit stelsel de waarde te bepalen. Om de grootte van het voorwerp en zijn afstand tot de lens langs mathematische weg te kunnen achterhalen is er dus nog een tweede vergelijking nodig. Deze wordt verkregen bij gebruik van een tweede camera, die het voorwerp vanuit een andere hoek registreert.

Voor deze rechttoe-rechtaan-aanpak is het nodig dat de onderlinge afstand tussen de gebruikte camera's en de brandpuntsafstanden van hun lenzen bekend zijn. In de praktijk zijn dit vaak lastig vast te stellen grootheden. De onnauwkeurigheden die worden geïntroduceerd bij het opmeten ervan maken dat deze aanpak slechts in speciale gevallen geschikt is voor het berekenen van 3D-coördinaten.

11. Crash-dummy's zijn belangrijke hulpmiddelen bij het vaststellen van de veiligheid van verkeersmiddelen, maar dan moeten de onderzoekers wel weten hoe goed het model met een levende mens overeenkomt. Bij deze dummy wordt de nek onder de loep genomen tijdens een zijwaartse botsing. Daartoe registreren high-speedcamera's de beweging van de kop terwijl die op de slede een versnelling krijgt. Het gedrag van de dummy-nek wordt vergeleken met dat van een menselijke nek.



11

Direct Linear Transformation

Flexibeler dan bovenstaande werkwijze zijn de zogenaamde fotogrammetrische methoden. Eén daarvan is de *Direct Linear Transformation* (DLT). Bij deze werkwijze worden steeds ook enkele merktekens opgenomen die zich op bekende plaatsen in de buurt van het bewegend voorwerp bevinden. Deze oorspronkelijk voor topografie ontwikkelde methode gaat uit van een lineaire relatie tussen de coördinaten van een punt (X, Y en Z) en de coördinaten van zijn projectie (x en y). De relatie voor één enkel punt wordt beschreven door een tweetal vergelijkingen (de DLT-formules, zie Intermezzo) waarin elf parameters voorkomen. In deze DLT-parameters ligt de informatie besloten over de plaats en de 'kijkrichting' van de camera en de brandpuntsafstand van de lens. Deze hoeven we dus niet op te meten.

Om uit de projectiecoördinaten weer ruimtelijke coördinaten te kunnen berekenen moeten de DLT-parameters bekend zijn. Deze kunnen worden bepaald met behulp van een *referentiefraam*. Dit is de verzameling merktekens met nauwkeurig bepaalde ruimtelijke posities. In een opname van het referentiefraam voegt

elk merkteken twee vergelijkingen (twee DLT-formules) toe aan een stelsel van onafhankelijke, lineaire vergelijkingen waarin de DLT-parameters de enige onbekenden zijn. Immers: X, Y en Z van het merkteken zijn bekend en x en y kan de beeldanalist in de projectie (de opname) opmeten. Om de elf DLT-parameters te kunnen bepalen moeten er dus minstens zes merktekens (twaalf vergelijkingen) in beeld zijn. Het vinden van waarden voor de onbekenden in zo'n stelsel van vergelijkingen (in de wiskunde spreekt men van het oplossen van het stelsel) is een heel karwei als men alleen pen en papier tot zijn beschikking heeft. Het voorschrift voor de wiskundige bewerking is echter vrij simpel en laat zich daarom gemakkelijk in een computerprogramma onderbrengen. Is dit eenmaal gebeurd, dan heeft een snelle microcomputer niet meer dan een fractie van een seconde nodig om het stelsel op te lossen.

Wanneer de DLT-parameters van tenminste twee camera's zijn bepaald, kunnen de 3D-coördinaten (X, Y en Z) van een willekeurig punt in de ruimte worden teruggerekend. Als namelijk de xy -coördinaten van de projectie van dat punt zijn opgemeten, zijn X, Y en Z de enige drie onbekenden in de twee DLT-for-



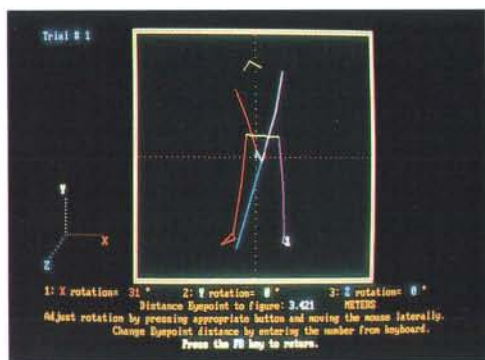
12

mules. Iedere camera voegt twee vergelijkingen aan het stelsel toe. Twee camera's (= 4 vergelijkingen) zijn dus voldoende om de drie ruimtelijke coördinaten (X, Y en Z) te bepalen.

Wordt er met vaste camera-instellingen gewerkt dan hoeven we de DLT-parameters maar één keer te bepalen. Dit kan bijvoorbeeld voorafgaand aan een meting gebeuren. Het referentiefraam is na deze kalibratie niet meer nodig. Worden de camera's daarentegen meebewogen met een voorwerp dat zich verplaatst, dan moeten we voor ieder beeldje opnieuw de DLT-parameters bepalen. Daarom moet ieder beeldje (een gedeelte van) het referentiefraam tonen.

DLT in de praktijk

Laten we terugkeren naar de WK-finale uit het begin van dit artikel, waarbij het er om ging of de bal 'zat' (het doelvlak heeft gepasseerd) of niet. Tegenwoordig staat er bij belangrijke wedstrijden een groot aantal camera's opgesteld. Het dus waarschijnlijk dat een kritiek moment



13a



b

12. Waar mens en machine naadloos in elkaar over moeten gaan, zoals in de cockpit van een jachtvliegtuig, moet de machine perfect zijn aangepast aan menselijke bewegingen. Bewegingsanalyse maakt dat mogelijk. Daartoe is deze piloot van merktekens voorzien.

13. Alleen voor afzonderlijke punten van een object kunnen de 3D-coördinaten worden berekend. Om de samenhang tussen die punten duidelijk te maken worden ze vaak verbonden. Een reconstructie op verschillende tijdstippen in één beeld, levert een overzicht van de beweging.

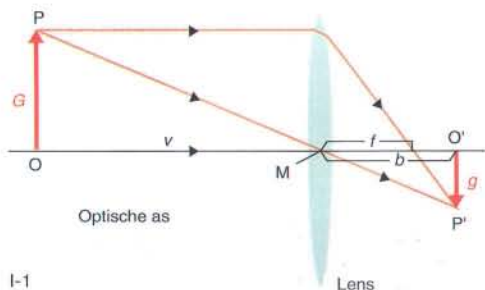
vanuit verschillende hoeken wordt vastgelegd. Met zijn moderne apparatuur kan de regisseur die verschillende beelden in een handomdraai terugzoeken. Als in de regieruimte een micro-computer staat die de beelden met behulp van een genlock of frame-grabber kan inlezen, kan daarop de DLT-methode worden uitgevoerd.

De enige praktische eis die de DLT-methode stelt is een referentie-frame op de beelden. Dit kan bestaan uit streepjes op de doelpalen en -lat, waarvan de precieze posities van tevoren

Projectie en DLT-formules

In een film- of videocamera projecteert een lenzenstelsel het beeld van de buitenwereld op een lichtgevoelig vlak. In afbeelding I-1 is schematisch geconstrueerd waar een voorwerp OP bij projectie via een bolle lens een scherpe afbeelding O'P' vormt. Het voorwerp bevindt zich op een afstand v voor de lens. De constructie van het beeld is mogelijk doordat de van het voorwerp afkomstige lichtstralen die door het optische middelpunt M gaan, hun weg ongebroken vervolgen en de lichtstralen die evenwijdig aan de optische as invallen, na breking door het brandpunt gaan (een punt dat op een karakteristieke afstand f achter de lens ligt). Op een afstand b achter de lens ontstaat een scherp beeld.

Omdat driehoek OPM en driehoek O'P'M gelijkvormig zijn, geldt dat de grootte G van het voorwerp zich tot de grootte g van zijn beeld verhoudt als v tot



I-1

b . Naarmate het voorwerp verder van de lens afstaat, zal het beeld dichterbij het brandpunt liggen. In de praktijk zal de afstand van het lichtgevoelige vlak tot de lens verwaarloosbaar weinig verschillen van de brandpuntsafstand ($b = f$). In dat geval geldt:

$$\frac{G}{g} = \frac{v}{f} \quad (1)$$

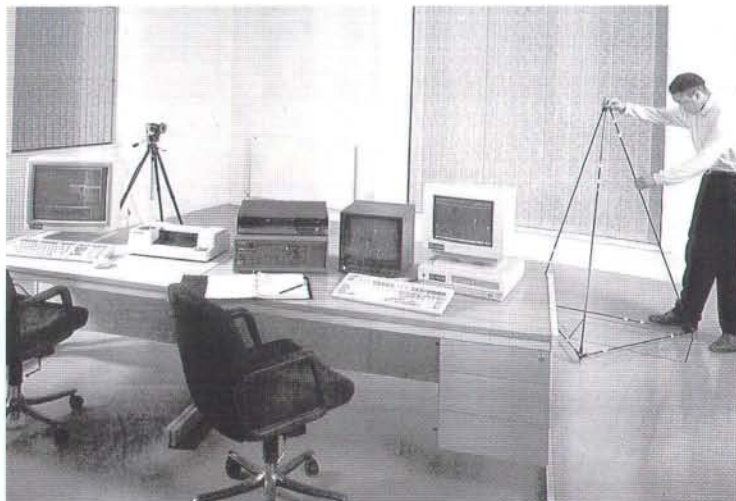
Om deze projectieformule te kunnen toepassen dient de ruimtelijke positie van een punt P ten opzichte van hetzelfde assenstelsel gegeven te worden als de positie van zijn projectie P'. In afbeelding I-2 is een assenstelsel getekend dat hiervoor in aanmerking komt. De oorsprong van het stelsel valt samen met het optisch middelpunt van de cameralens. De projectieformule (1) splitst nu op in twee vergelijkingen:

$$\frac{X'}{x} = \frac{Z'}{f} \quad (2)$$

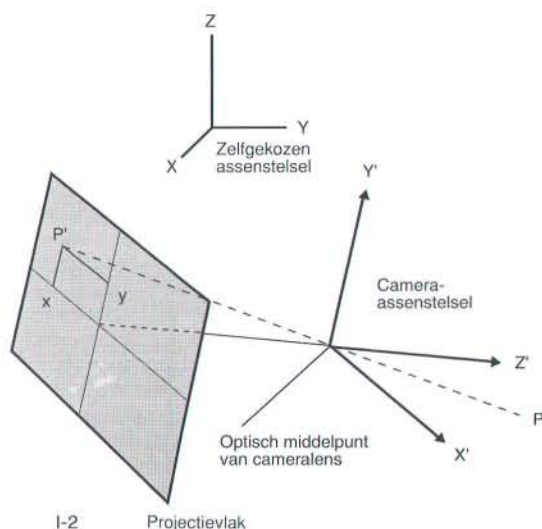
$$\frac{Y'}{y} = \frac{Z'}{f} \quad (3)$$

Hierin zijn X' , Y' en Z' de ruimtelijke coördinaten van het punt en x en y de coördinaten van zijn beeld in het projectievlak (dit kan het lichtgevoelige vlak zijn of een vergroting daarvan).

14. Om beelden te kunnen analyseren met behulp van de DLT-methode is een referentiefraam onmisbaar. Zo'n fraam kan bij een vaste camera-opstelling bestaan uit een verplaatsbare stellage met merktekens (zoals op deze foto), die na de eerste filmbeelden kan worden weggehaald. Bij een camera die met het object meebeweegt moeten op elk beeldje tenminste zes bekende, vaste punten zichtbaar zijn.



14



Uitgangspunt bij de ontwikkeling van de Direct-Linear-Transformationmethode (DLT) was niet langer afhankelijk te zijn van de positie en oriëntatie van de camera. De positie (X,Y,Z) van een punt P moest ten opzichte van een zelf gekozen assenstelsel bepaald kunnen worden. Nu bestaat er tussen zo'n zelfgekozen assenstelsel en het stelsel dat aan de camera vastzit een verband: de stelsels zijn door middel van lineaire transformaties (enkele rotaties en een trans-

latie) in elkaar om te vormen. In matrixalgebra laat zich dat als volgt opschrijven:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_4 & L_5 & L_6 \\ L_7 & L_8 & L_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_{10} \\ L_{11} \\ L_{12} \end{pmatrix} \quad (4)$$

De elementen L_1 t/m L_9 van de rotatiematrix beschrijven de oriëntatie van de camera, terwijl in de elementen L_{10} t/m L_{12} van de translatievector de camerapositie besloten ligt. In uitgeschreven vorm ziet (4) er als volgt uit:

$$\begin{aligned} X' &= L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_{10} \\ Y' &= L_4 X + L_5 Y + L_6 Z + L_{11} \\ Z' &= L_7 X + L_8 Y + L_9 Z + L_{12} \end{aligned}$$

Deze uitdrukkingen voor X' , Y' en Z' kunnen worden ingevuld in (2) en (3). Het uitwerken van de aldus ontstane vergelijkingen leidt uiteindelijk tot twee vergelijkingen, de zogenaamde DLT-formules:

$$\begin{aligned} A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4 - A_9 X X - A_{10} X Y + A_{11} X Z &= x \\ A_5 X + A_6 Y + A_7 Z + A_8 - A_9 Y X - A_{10} Y Y + A_{11} Y Z &= y \end{aligned}$$

Hierin is $A_1 = f(L_1/L_{12})$, $A_2 = f(L_2/L_{12})$ etc. Bij het uitwerken is niet alleen het aantal parameters teruggebracht van twaalf tot elf, maar is ook de brandpuntsafstand f een zogenaamde impliciete factor geworden.

zijn opgemeten. Op de verschillende beelden moeten een aantal van deze streepjes (tenminste zes) en het middelpunt van de bal handmatig worden gedigitaliseerd. Omdat het berekenen van één enkele positie (het middelpunt van de bal) nauwelijks tijd in beslag neemt, kan de scheidsrechter binnen de duur van enkele reclamespots uitsluitel krijgen over de geldigheid van het doelpunt. Deze uitspraak is zeer betrouwbaar doordat de DLT-methode erg nauwkeurig is. In dit voorbeeld omsluit het referentiefraam een beeldvolume van ongeveer twintig kubieke meter. De absolute fout zal daarbij hooguit enkele millimeters bedragen.

De geringe praktische vereisten en de hoge betrouwbaarheid van de resultaten maken dat DLT verreweg de meest toegepaste methode is bij driedimensionale bewegingsstudies.

Bronvermelding illustraties

Peak Performance Technologies Inc., München, D: pag. 708-709 en 13
 Selcom AB, Partille, S: inzet pag. 709
 Popperfoto, Londen: 1
 Ingenieursbureau Geodelta BV, Rijswijk: 2 en 3
 Instituut voor Wegtransportmiddelen TNO, Delft: 4 en 5
 (i.s.m. Centrum TNO Leder en Schoeisel, Waalwijk), 11
 (i.s.m. Naval Biodynamics Laboratory, New Orleans)
 Audio Visueel Centrum, VU, Amsterdam: 6
 ABC-press, Amsterdam: 7
 R. Jacobs, VU, Amsterdam: 8
 Oxford Metrics Ltd., Oxford, UK: 9 (i.s.m. Gait Analysis Laboratory, University of Southern Illinois), 10, 12 en 14

ANALYSE & KATALYSE

INTEGRATIE VAN WETENSCHAP EN TECHNOLOGIE IN DE SAMENLEVING

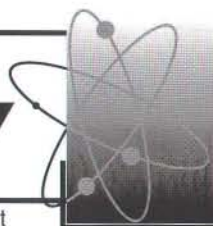
Onder redactie van ir. S. Rozendaal.

De wetenschapsman

andrej

SACHAROV

Datgene, wat de kranten vergaten te vermelden over de beroemde dissident



Wie was Andrej Sacharov? Stelt men deze vraag aan een doorsnee van de westerse bevolking, dan is het antwoord vermoedelijk: een Russische dissident. De iets beter geïnformeerden zullen wellicht zeggen dat de in december 1989 overleden dissident tevens een geleerde was. En heel misschien dat die enkeling die echt dagelijks de krant leest, zou weten dat Sacharov een natuurwetenschapper was. Had hij niet iets met de waterstofbom te maken? Een Nobelprijs?

Eigenlijk is er heel weinig bekend over de natuurwetenschapsman Andrej Sacharov. Dat is niet uitzonderlijk: de meeste natuurwetenschapsmensen zijn nauwelijks bekend bij het grote publiek, zelfs niet als ze een Nobelprijs krijgen. Slechts Einstein vormt hier een uitzondering op.

Andrej Sacharov trad in de schijnwerpers toen hij stelling nam tegen de Sovjet-regering in kwesties die met de mensenrechten verband hielden. Toen al was de Russische natuurkundige thuis gevierd en bejubeld. Hij was lid van de Academie van Wetenschappen (iets dat in de Sovjetunie oneindig veel meer status heeft dan in Nederland — slechts in Frankrijk lijkt het er een beetje op), had een borst

vol onderscheidingen en zakken vol prijzengeld, maar was buiten zijn land als wetenschapper vrijwel onbekend. Mijn encyclopedie uit 1968 geeft onder Sacharov slechts een balletdanser.

In het Westen is Sacharov in het domein van de universitaire slavisten, de buitenlandse correspondenten in Moskou, de diplomaten en politici en de buitenlandredacteuren van kranten terechtgekomen. En dat zijn mensen die op de middelbare school al niets van wis- en natuurkunde moesten hebben en studies kozen waar ze bij voorkeur niet hoefden te worteltrekken. Het hoeft dus niet verbazingwekkend te zijn dat over de wetenschappelijke kant van Sacharov zo weinig bekend is.

Jammer. Want Sacharov is in de allereerste plaats natuurwetenschapper en pas daarna een mensenrechtenactivist en dissident. Dat blijkt overduidelijk uit zijn autobiografie. Zelfs op de momenten dat Sacharov druk bezig is met een brief aan president Carter of koningin Elizabeth, is zijn hoofd bij de natuurkunde. Alle mensen die Sacharovs autobiografie gekocht hebben op basis van zijn reputatie als activist en dissident komen dan ook regelmatig quarks, gluonen, tokamaks en andere vize woorden tegen.

Voortdurend bruist het enthousiasme van de natuurwe-

tenschapper. Zelfs tijdens zijn verbanning uit Moskou (in Gorki, waar hij bijna niemand kent, niet in zijn eigen huis woont en zijn vrouw slechts af en toe ziet) kan hij zich opmerkelijk druk maken over puur fundamenteel-wetenschappelijke discussies zoals de vraag of er na de uitdijende fase van het heelal weer een inkrimping volgt en daarna weer een *Big Bang*. Het ene moment bereidt hij acties tegen een veroordeling van een dissident voor, dan weer vraagt hij zich af of het mogelijk is een vorm van gecomprimeerde informatie te bedenken waardoor beschavingen van de ene cyclus van heelal-uitdijende en -inkrimping hun wijsheid naar de andere kunnen overdragen. Van hier en nu naar het post-Big-Bang-tijdperk.

Misschien was Sacharov inderdaad wel naïef. Dat scheldwoord is tijdens zijn (tweede, maatschappelijke) leven voortdurend door de Sovjet-autoriteiten en vooral door de KGB (de geheime dienst waarmee Sacharov jarenlang oorlog heeft gevoerd) tegen hem gebruikt. Sacharov als naïeve geleerde die door de joodse (tjonge jonge, wat heeft de Sovjet-samenleving antisemitische trekjes) Jelena Bonner werd opgestookt. Maar je kunt het ook omdraaien en van naïef een geuzenbenaming maken. De naïviteit van

veel grote geleerden die op eens tijdens een gesprek kunnen wegdromen over een of ander vraagstuk. Een naïviteit die de wereld leuker en beschafferder maakt.

Uitblikker

Andrej Sacharov werd in 1921 geboren. Eén grootvader was generaal-majoor, de ander

advocaat, zijn vader natuurkundeleraar en schrijver van populair-wetenschappelijke boeken, zijn moeder gymnastieklerares. In het gezin Sacharov werd piano gespeeld, Hector Malots *Alleen op de wereld* en Harriet Beecher-Stowes *De negerhut van Oom Tom* gelezen en Andrejs vader was bevriend met de componist Skrjabin. Met an-

dere woorden: Sacharov kwam uit de hoogste Russische sociaal-economische klasse.

Vanaf zijn twaalfde mag Andrej af en toe mee naar het laboratorium van het instituut waar zijn vader het practicum leidt. Al heel snel openbaart zich Andrejs enthousiasme voor natuurkunde en wiskunde en staat het vast dat hij aan de universiteit natuurkunde gaat studeren. De invloed van zijn vader is groot. Als Andrej dertien jaar is, wordt hij van school gehaald door zijn vader die meent dat hij zelf een betere leraar is, en hij bewijst het: Andrej doet twee klassen in een jaar.

"Vader gaf me les in wis- en natuurkunde, en we deden eenvoudige proeven, die ik van hem in mijn schrift moest noteren en uittekenen (. . .) Ik leerde spelenderwijs en had aan een half woord genoeg, en ik werd geweldig geboeid door de gedachte dat alles in de natuur teruggebracht kon worden tot de betrekkelijk eenvoudige, in wiskundige formules uitgedrukte wetten van het atoom. Ik begreep nog niet helemaal wat differentiaalvergelijkingen waren, maar de almacht ervan voelde ik toch wel aan en ik vond dat prachtig. Wellicht is uit die verrukking bij mij het verlangen ontstaan natuurkundige te worden."

Hij gaat thuis proeven doen. Eerst met een van de populair-wetenschappelijke boeken van zijn vader in de hand (zoals *Proeven met een elektrische lamp*), later meer improviserend (van een stuk huishoudzeep een potentiometer maken). Niet alleen de natuurkunde boeit hem, hij leest ook boeken over paleontologie en erfelijkheidsleer. Dat laatste is interessant omdat Sacharov nog een rolletje zou spelen bij de val van de pseu-



1989: Sacharov spreekt de Sovjetacademie van Wetenschappen toe (foto: ANP)

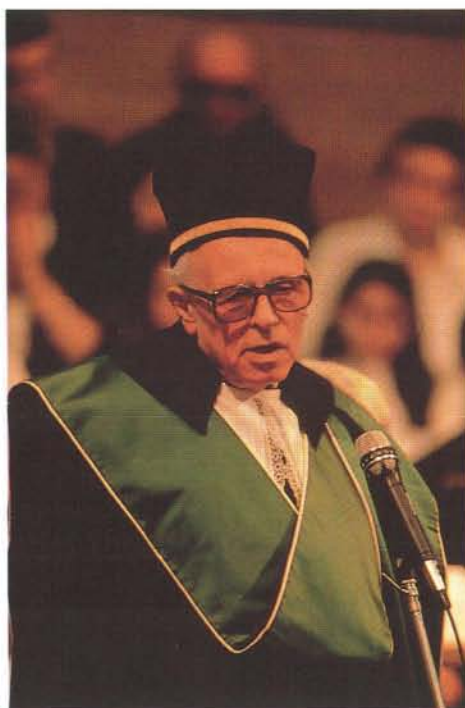
do-wetenschapper Lysenko, die de moderne erfelijkheidsleer niet accepteerde.

Andrej Sacharov sloot zijn eindexamen af als uitblinker — waardoor hij in 1938 rechtstreeks naar de universiteit van Moskou kon, zonder de zware toelatingsexamens af te hoeven leggen. Op de universiteit is er ook het college marxisme-leninisme. Daar werden dan vragen gesteld in de trant van: 'zijn het verdrag en de toenadering tussen de Sovjetunie en Duitsland van opportunistische of principiële aard?' Het antwoord moest dan zijn: 'van principiële aard'. Het was het enige vak waar Sacharov ooit onvoldoendes haalde. Wat dat betreft had het vak een aardige voorspellende waarde: ook later had Sacharov de nodige moeite met de praktijk van het marxisme-leninisme.

Hoe anders is het om als jonge man op te groeien in de Sovjetunie, zelfs al is je hoofd vooral bij differentiaalrekeningen en loop je ongevraagd extra wiskundecolleges. Dan weer komt een familielid in een concentratiekamp in Siberië terecht, dan weer wordt een hoogleraar lastig gevallen omdat hij niet marxistisch genoeg is. Als je dat allemaal leest, is het heel begrijpelijk dat al deze observaties die in Sacharovs hoofd werden opgeslagen hem later in zijn protestfase voortstuwden.

Sacharov was overigens als student nog weinig maatschappelijk bewust. Hij meldt dat hij niet verontwaardigd was over de samenwerking tussen nazi-Duitsland en communistisch Rusland (het Molotov-Ribbentrop-pact). "Ik begreep er heel weinig van."

In 1941 komt Moskou onder vuur te liggen en wordt de universiteit geëvacueerd. Ook moesten studenten hun oplei-



Sacharov neemt in Bologna een ere-doctoraat in de natuurkunde en een in de sterrenkunde in ontvangst (1989) (foto: ANP)

ding met een jaar verkorten, tot vier jaar. Tot genoegen waarschijnlijk van Nederlandse onderwijsministers vindt Sacharov dat echter niet erg. "Dit is een van de redenen waarom er nog steeds grote hiaten zitten in mijn opleiding als theoretisch natuurkundige. En toch geloof ik dat het beter is vier jaar serieus te studeren, direct gevolgd door zelfstandig onderzoek, dan om een jaar of zeven, acht aan de universiteit rond te lopen. De vaart gaat er dan uit en het is moeilijk weer op gang te komen."

In 1942 studeert Sacharov cum laude af als specialist 'defensiemetallurgie'. De man die later vredesduif werd en de Nobelprijs voor de vrede kreeg, is in de militaire research gepokt en gemazeld. Hij is er in afgestudeerd en heeft zijn eerste arbeidervaring in een patronenfabriek in

oorlogstijd opgedaan. Hij bestudeerde daar een onderwerp dat wel heel erg in de 'bommen-en-granaten-sfeer' lag: hij ontwierp een niet-destructief instrument om te controleren of de kern van een pantsergranaat voldoende was gehard, waarvoor hij een octrooi verwerft. Het hoogtepunt van zijn wetenschappelijke loopbaan vindt later in dienst van de ontwikkeling van de waterstofbom plaats. Een vreemde speling van het lot dat juist zo iemand later vredesduif wordt — of was dit misschien juist noodzakelijk? Hij kon met zoveel overtuiging en inzicht de vrede prediken omdat hij het defensiebedrijf van binnen kende.

Spionage?

De overstap van pantsergranaten en pistoolkogels naar zuiver wetenschappelijk on-

derzoek geschiedt in 1944. Sacharov gaat mede door de contacten van zijn vader op het instituut van de ook in het Westen beroemde fysicus Igor Tamm werken. Tamm leert de begaafde natuurkundige dat er meer nodig is om echt goed te worden: zo moet Sacharov niet alleen Duits maar ook Engels leren lezen. Bij Tamm verdiept Sacharov zich ook in de relativiteitstheorie en de quantummechanica.

In 1947 publiceert Sacharov zijn eerste wetenschappelijk artikel en wordt gelijk geconfronteerd met de geslotenheid van de Sovjet-wetenschap. De titel die hij voorstelde *Het genereren van mesonen* mag niet omdat de vijand overal op de loer zou liggen. Sacharov promoveert op een kernfysisch, quantummechanisch proefschrift dat verband hield met de diverse energieniveaus binnen het waterstofatoom. In die tijd — rond 1947 — bevindt Sacharov zich in de internationale frontlinie van de theoretische natuurkunde en staat op het punt om dezelfde grote analyses te maken als de Amerikaan Richard Feynman in die tijd doet. "Ik miste de kans het allerbelangrijkste werk van die tijd te verrichten, en met afstand het allerbelangrijkste van mijn leven."

In 1948 buigt Sacharov zich voor het eerst over kernfusieberekeningen. Vlak daarna wordt hij heel geheimzinnig door Tamm voor een speciaal gesprek uitgenodigd. Tamm was door de ministerraad en de partij aangewezen om een onderzoeksgroep te leiden die de mogelijkheid van het maken van een waterstofbom moest onderzoeken en Tamm wilde Sacharov erbij hebben. Interessant is dat Sacharov achteraf vermoedt dat de eerste ideeën waaraan hij moest rekenen, door spionage verkregen zijn. Dat is ook elders

wel gesuggereerd: vooral de spionage-activiteiten van Klaus Fuchs in Los Alamos (het geheime Manhattan-project om de bom te maken) zouden de Sovjets op dit spoor hebben gezet.

Sacharov geeft diverse redenen waarom hij niet weigerde om zijn talent in te zetten voor massavernietigingswapens.

Nummer 1: "In 1948 vroeg niemand of ik wel of niet wilde meedoen aan zulk werk." Nummer 2: "De fysica van de atoom- en thermonucleaire explosie is een 'paradijs voor theoretici'." Nummer 3: "We waren door een ware oorlogspsychologie bevangen."

Achteraf is daar een vierde argument bijgekomen: "Mijn allergrootste droom is nog steeds dat ze alleen worden gebruikt om oorlog te voorkomen en nooit om oorlog te voeren. Hebben wij en de Amerikaanse atoomgeleer-

charov denkt achteraf dat Teller, die meende dat Amerika's militaire kracht de Sovjetunie zou afschrikken, gelijk had. "Iedere Amerikaanse stap om het werk aan een waterstofbom te staken of op te schorten zou zijn opgevat als een listige afleidingsmanoeuvre of als een bewijs van domheid en zwakte." Voor westerlingen is dat een interessante en politiek misschien ietwat verwarrende observatie: de 'linkse duif' Sacharov (die in 1975 de Nobelprijs voor de vrede kreeg) kiest partij en voor de 'rechtse havik'.

Vanaf 1950 tot 1968 heeft Sacharov onderzoek gedaan aan de ontwikkeling van waterstofbommen. Er was een immense geheimhouding: een typiste die een papiertje verbrandde zonder dat te registreren, kreeg een jaar gevangenisstraf en de chef van de veiligheidsdienst waar dit on-

Zelfs tijdens zijn verbanning bleef zijn hoofd bij de wetenschap en vraagt hij zich af of beschavingen door een Big Bang heen kennis kunnen transporteren

den bijgedragen tot het behoud van de vrede?... het evenwicht van de nucleaire afschrikking — de dreiging van de wederzijds gegarandeerde vernietiging — heeft misschien zo'n oorlog helpen voorkomen. Maar ik ben daar niet zeker van en toen, in die lang vervlogen jaren, kwam dat niet eens aan de orde."

Interessant is dat Sacharov het conflict tussen Oppenheimer en Teller aanhaalt, de beide grote mannen van het Amerikaanse atoombomproject die later ruzie kregen over de vraag of de waterstofbom ontwikkeld moest worden. Sa-

benullige voorval onder viel, pleegde zelfmoord. Sacharov heeft een contract moeten ondertekenen dat hij daar geen informatie over naar buiten zou brengen en het moet gezegd worden, hij houdt zich daar redelijk keurig aan. Hij noemt bijvoorbeeld niet waar het geschiedt, de plaats duidt hij aan met 'Het Object'.

Conflict

Sacharov werkt nog maar kort in dit afgelegen en zwaar bewaakte laboratorium als hij een alternatieve constructie voor de waterstofbom ontwik-

kelt. Niet het oorspronkelijke idee, waarvan Sacharov vermoedde dat het door spionage was verkregen, maar zijn eigen idee. Dat wordt uiteindelijk aangenomen en Sacharov is daarmee in feite de ontwerper van de Sovjet waterstofbom.

Tevens ontwikkelt Sacharov samen met zijn leermeester Tamm en de Russische kernenergie-pionier Koertsjatov in die periode het basisontwerp voor kernfusie — de magnetische isolatie die is toegepast in de Tokamak-reactor, nog steeds het meest gangbare kernfusiemodel.

Op 12 augustus 1953 vindt de eerste succesvolle kernproef plaats met Sacharovs bom. Er volgen er meer en Sacharov begint zich (halverwege de jaren vijftig) steeds meer zorgen te maken over de biologische effecten van de proeven. De dertiger Sacharov gaat lang-

zaam maar zeker om zich heen kijken. Maar ambivalent is hij nog steeds. Zo meldt hij (wel eerlijk trouwens) bedremmeld dat hij in 1953 bij de dood van Stalin aan zijn eerste vrouw schreef: "Ik ben onder de indruk van de dood van een groot man. Ik denk aan zijn menselijkheid."

In deze tijd wordt Sacharov een gevierd burger. In 1953, na de proef met de waterstofbom, wordt hij tot lid van de Academie van Wetenschappen benoemd en mag dan profiteren van de privileges die daarbij horen, onder andere de beschikking over een auto. Vlak daarna krijgt hij de titel *Held van de socialistische arbeiden* een Stalinprijs met een veel hogere beloning dan normaal, vijfhonderdduizend roebel. In 1955 wordt hij voor de tweede keer tot *Held* benoemd en krijgt hij de Leninprijs (opvolger van de Stalin-

prijs). In 1962 wordt hij voor de derde keer *Held*. Hij komt ook op goede voet met tal van Sovjet-politici (Beria, Chroetsjov, Breznev). Als Sacharov eens met een collega de kamer van Breznev binnenkomt, roept deze "Daar hebben we de bommenmakers!"

Zo langzamerhand echter wordt Sacharov een ander mens. Vooral naar aanleiding van zijn bespiegelingen over de biologische effecten van kernproeven wordt hij steeds opstandiger en poogt door middel van brieven en gesprekken het doen van kernproeven stop te zetten. Naïviteit? Veel mensen hadden geredeneerd: 'Wat voor zin heeft verzet, hoe kan ik als enkel individu het doen van kernproeven, van zo'n strategisch belang voor de supermacht Sovjetunie, stopzetten?'



Andrej Sacharov
met zijn vrouw
Jelena Bonner
in 1984 (Foto: ANP)

Langzaam slaat de officiële waardering voor Sacharov om in irritatie. Chroetsjov reageert met een rood hoofd op de suggestie tijdens een vergadering met bommentwerpers om met de proeven te stoppen. "Sacharov, probeer ons, politici, niet te dicteren wat we moeten doen en hoe we ons moeten opstellen. Ik zou een slapjanus en geen voorzitter van de ministerraad zijn als ik naar mensen als Sacharov luisterde!"

Sacharov wordt maatschappelijk steeds actiever. Zo stuurt hij het in 1964 aan op een regelrecht conflict met Lysenko, de charlatan die al decennia lang de Russische biologie en landbouw achterlijk hield. Een vazal van Lysenko zou tot lid van de Academie van Wetenschappen worden gekozen. Sacharov verzet zich en zegt onder andere: "Samen met academielid Lysenko is hij verantwoordelijk voor de schandelijke achterstand van de Sovjetbiologie." Groot rumoer in de zaal. Lysenko roept: "Ze moeten mensen als Sacharov vastzetten! Veroordelen!"

Postume eer

In de jaren zestig begint de tweede loopbaan van Sacharov. Toch blijft hij ook wetenschappelijk actief. Zijn interesse verlegt zich van atoombommen en kernfusie naar kosmologie. Niet onlogisch, want bij alle drie fenomenen spelen vergelijkbare fundamentele fysische processen. Sacharov interesseert zich voor de asymmetrische verdeling van elementaire deeltjes in het heelal (er zijn veel meer protonen en neutronen dan de antideeltjes daarvan) en publiceert er diverse studies over. Opmerkelijk is dat Sacharov zich betrekkelijk snel in dit voor hem nieuwe weten-

schapsgebied inwerkt. In het recente boek van Igor Novikov *Zwarte Gat* (volgens *New Scientist* "het Russische antwoord op *Het heelal* van Stephen Hawking") wordt het werk van Sacharov hierover in een adem genoemd met dat van Nobelprijswinnaar Steven Weinberg. Sacharov kan in een bepaalde zin wegbereider worden genoemd van de unificatietheorieën, die alle natuurkrachten onder een enkele formule brengen.

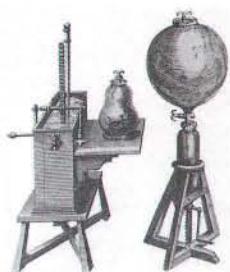
Vanaf 1968 begint Sacharov aan een indrukwekkende verzameling acties voor en tegen van alles en nog wat. Omdat dit de kant van Sacharov betreft waar in het algemeen het meest over bekend is, zal daar in dit artikel over worden gezegd. Hij is hierin sterk gestimuleerd door zijn tweede vrouw, Jelena Bonner, maar hij was al duidelijk actief vóór zij in zijn leven kwam. De poging van de KGB om Sacharov af te schilderen als een goede Rus die in de tweede helft van zijn leven op sleeptouw werd genomen door de onbetrouwbare niet-Russin Bonner is dan ook niet alleen anti-semitisch, maar ook onjuist.

Sacharov is een monument voor maatschappelijk bewustzijn van wetenschapsmensen. Veel onderzoekers hebben nog steeds een houding van 'wetenschap en politiek hebben niets met elkaar te maken' en weigeren uit het raam van hun laboratorium te kijken. Misschien kan dat in rustige democratieën als Nederland en België, zelfs dat is de vraag, maar het kon zeker niet in een land als de Sovjetunie waar alles, inclusief de wetenschap, doordrenkt was met politiek. Sacharov bevond zich bij zijn acties vooral in het gezelschap van schrijvers, dichters en andere kunstenaars. Keer op keer krijgt hij bij zijn wetenschappelijke collega's nul op

het rekest als hij ze weer eens vraagt om een brief te ondertekenen. Zelfs als Sacharov in 1980 naar Gorki wordt verbannen en zijn medailles en eretitels hem worden afgenomen, zwijgt de Russische wetenschap. Bijna niemand komt hem er bijvoorbeeld opzoeken, een simpele handeling die vrijwel niemand in gevaar had kunnen brengen. Op enkelingen als de later naar Engeland geëmigreerde biochemicus Zhores Medvedev en natuurkundige Pjotr Kapitsa na, stellen de Sovjet-wetenschapsmensen teveel prijs op hun privileges en buigen zich, pretenderend dat ze niet zien wat voor schandalige dingen er in hun land gebeuren, over hun microscopen en boeken. Misschien voelt men zich daarover achteraf toch schuldig. Het belangrijkste natuurkundige tijdschrift van de Sovjetunie, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, wijdde in mei — Sacharov zou zeventig geworden zijn — het hele nummer aan hem.

Jammer dat zo'n bijzondere wetenschapsman en zo'n groot mens de eer van zijn collega's pas postuum kreeg. Zouden Nederlandse en Belgische wetenschapsmensen wél hun mond hebben opengedaan als Andrej Sacharov in onze dreven was geboren?

Andrej Sacharov, *Mijn leven*, Meulenhoff, Amsterdam, 1990.
Igor Novikov, *Zwarte gaten*, Contact, Amsterdam, 1991.



De geboorte van

HET EXPERIMENT

Een nieuwe kijk op de strijd tussen Boyle en Hobbes over het belang van hypothesen en proeven

De vader van de scheikunde, zo luidt het Ierse grafschrift van Robert Boyle (1627-1691). Op de middelbare school is hij vooral bekend door *de wet van Boyle*, die luidt dat druk en volume van een gas bij een bepaalde temperatuur omgekeerd evenredig zijn.

Het relaas van Boyles experimenten heeft de kracht van een mythe gekregen. Dit geldt met name voor zijn proeven met het trekken van vacuüm door middel van de vacuümpomp, indertijd een nieuwe machine. Het gezaghebbende Britse werk *Harvard case histories in experimental science* over de geschiedenis van de wetenschap, koos Boyle voor het eerste verhaal. Met hem was het experiment immers zijn zegetocht begonnen als dé manier om kennis over de werkelijkheid te vergaren.

Waar komt dit idee vandaan? De klassieke geschiedkunde schrijft het toe aan het experiment zelf: de resultaten waren overtuigend voor de Royal Society, de belangrijkste verzameling Engelse 'experimentele filosofen' uit die tijd. In 1985 hebben de Britse historici Simon Schaffer en Steven Shapin dit klassieke verhaal in twijfel getrokken. In een omvangrijke, gedetailleerde studie, *Leviathan and the air-Pump. Hobbes, Boyle and the experimental life* wer-

pen zij een nieuw licht op de zeventiende-eeuwse wetenschapper. Het boek heeft onder wetenschapshistorici en -sociologen veel aandacht getrokken en staat inmiddels zelf model voor een nieuwe aanpak van de geschiedenis van de wetenschap.

Kermisvermaak

De Boyle van Schaffer en Shapin is een geheel ander figuur dan die wij van de middelbare school kennen. Zo hield hij niet van wiskunde. Schaffer (35 jaar, op dit moment docent in Cambridge): "Boyle heeft nooit zoiets als de moderne *wet van Boyle* opgeschreven. Hij verafschuwde mathematische formules, de wiskunde mocht de rijkdom van het experiment niet tiraniseren".

De kijk van de twee Britten op de veel bezongen zeventiende-eeuwse experimentator is niet ontwikkeld door nieuwe bronnen te openen, maar door nieuwe vragen te stellen. Schaffer: "De meeste historici nemen het verschijnsel 'experiment' voor lief. Wij hebben onze vragen daar juist op gericht. Wij wilden weten wat een experiment is en hoe het wordt uitgevoerd. En we wilden achterhalen op welke manieren experimenten 'gegevens' produceren en wat de relatie is tussen die experimen-

tele gegevens en theoretische verklaringen."

Schaffer en Shapin pogen deze vragen te beantwoorden door het dispuut over de waarde van experimenten ten tijde van Boyle te ontrafelen. In het Engeland van 1660 waren Boyles opvattingen bepaald geen gemeengoed. Niet iedereen was gecharmeerd van het idee dat gepruts met immens dure apparatuur, zoals de vacuümpomp, kennis kon opleveren. De belangrijkste tegenstander van deze toenmalige *Big Science* was Thomas Hobbes (1588-1679), één van de beroemdste wetenschappers uit het midden van de zeventiende eeuw. In zijn verhandeling *Dialogus physicus de natura aeris* schreef hij over Boyle en zijn vrienden: "Zij vertonen nieuwe machines, om hun vacuüm en verbazingwekkende wonderen te laten zien, op dezelfde manier als de lieden die exotische dieren slechts tegen betaling tentoonstellen. Zij allen zijn mijn vijanden."

De "virtuosi", zoals Boyle en zijn medestanders werden genoemd, waren met hun pogingen 'lucht te wegen' goed voor menige grap. Het idee dat experimenteren met ingewikkelde apparatuur inzicht in de werkelijkheid kan op leveren, was voor Hobbes en de meeste van zijn tijdgenoten te belachelijk om waar te zijn. Dat was de naam filosofie niet waardig. Kennis kon slechts worden verworven via logische redeneringen, zoals meetkundige bewijzen. De filosoof moest beredeneren hoe gevolgen voortvloeien uit oorzaken. Natuurfilosofie uitte zich vaak in grootse systemen, die de gehele natuur, inclusief de mens, omvatten.

Boyle ging daar dwars tegenin. Hij wenste juist een strikte scheidslijn tussen theorie en observatie te trekken. Voor

hem was niet de waarneming onbetrouwbaar (zoals voor Hobbes het geval was), maar juist de theoretische interpretatie. Boyle beweerde zelfs bewust onkundig te zijn gebleven van elk filosofisch systeem, "zodat ik niet bevooroordeeld ben door welke theorie of welk principe dan ook". Kennis was in zijn ogen niet absoluut, maar altijd voorlopig. Ieder experimenteel feit kon door een volgend experiment worden weerlegd. Ook dit ging dwars tegen de gangbare denkwijze in.

De belangrijkste verandering die Boyle doorvoerde was echter de strikte scheiding tussen experimentele wetenschap en de maatschappij. Politiek en wetenschap moesten niets met elkaar te maken hebben. Experimenten konden alleen worden beoordeeld door mensen die het nut van experimenten inzagen. "Met welk nieuw experiment of gegeven heeft Mr. Hobbes de geschiedenis van de natuur verrijkt?", vroeg Boyle zich af en achtte daarmee de kous af. Zijn houding vloeiده overigens niet voort uit kleinzieligheid. In zijn boek *The sceptical chymist* achtte hij het bijvoorbeeld mogelijk dat alchemisten deel konden uitmaken van de gemeenschap van experimentatoren, mits zij experimentele gegevens produceerden. En dat was precies waar Hobbes principieel niet toe bereid was.

Hobbes' houding komt ons nu onbegrijpelijk voor. Deels doordat het experiment het ruim heeft gewonnen. Wij vinden het vanzelfsprekend dat natuurwetenschappers proberen doen en dat de resultaten iets zeggen over de eigenschappen van de natuur, onafhankelijk van die proeven. "Die gedachte is een verbazingwekkende vinding", aldus Schaffer. Het is vooral deze

veronderstelling die door Hobbes werd aangevallen, de experimentele uitkomsten werden immers door krakkemikkige machines als de vacuümpomp bepaald.

Het ding lekte

Het felle en jarenlange debat is uiteindelijk in het voordeel van Boyle beslecht. En dat in zó'n sterke mate dat vrijwel niemand zich vandaag nog herinnert dat Hobbes aan natuurwetenschappen deed! Hij is bekend als een filosoof die zich bezighield met politieke, psychologische en metafysische kwesties, maar zijn geschriften over natuurwetenschap zijn sinds de achttiende eeuw in vergetelheid geraakt.

Shapin en Schaffer hebben Hobbes weer in de belangstelling geplaatst, onder andere door de eerste Engelse vertaling van zijn *Dialogus physicus de natura aeris* (van de hand van Schaffer) als appendix uit te brengen.

Het boek is vooral door deze rehabilitatie opgevallen. Het gaat de Britten niet zozeer om een reconstructie van het zeventiende-eeuwse debat als zodanig, hoe gedegen ze dat ook doen. Hun voornaamste doel is de huidige positie van het experiment ter discussie te stellen: "Ons onderwerp is het experiment". De bezwaren



Robert Boyle (1627-1691) (afbeelding: National Portrait Gallery, London)

van Hobbes tegen de experimentele methode waren zo gek nog niet, is hun boodschap. "Hobbes had gelijk". Die boude bewering ondersteunen ze door de technieken die Boyle en Hobbes toepasten onder de loep te nemen. Boyles teksten en tekeningen lijken er op gericht de lezer een zo realistisch mogelijk indruk te geven van de experimenten. Deze moest ervan worden overtuigd dat betrouwbare heren alles precies zo hadden gedaan als beschreven. Als de proeven cruciaal waren, noemde Boyle zijn getuigen met naam en functie. Daarbij was het in zijn ogen vanzelfsprekend dat professoren

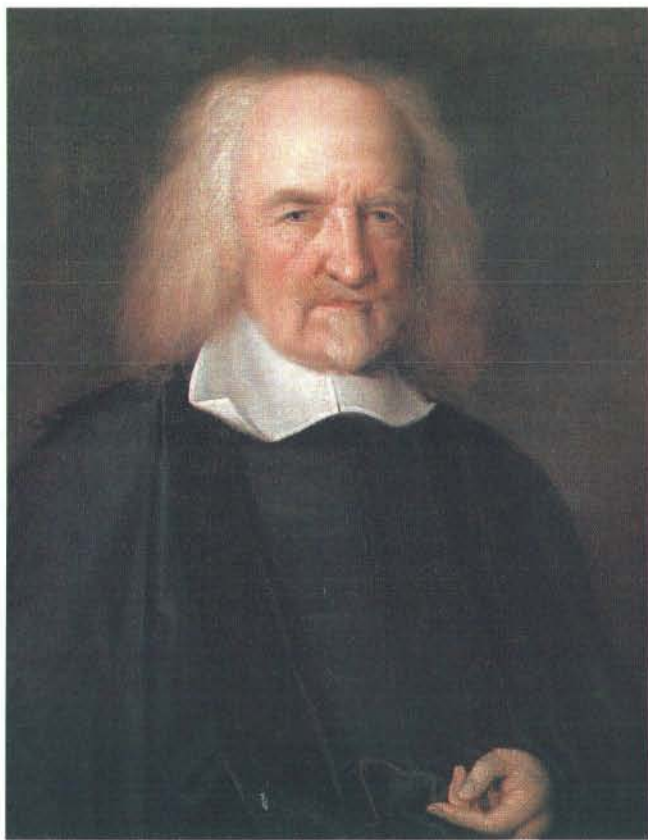
betrouwbaarder waren dan boeren.

Boyles literaire stijl was essentieel voor het slagen van zijn onderneming. Hij hanteerde het essay, korte stukken waarin de natuur beetje bij beetje werd beschreven. De schrijver moest in Boyles ogen bescheiden zijn en "niet meer beweren dan hij waar kan maken". Hij gebruikte veelvuldig uitdrukkingen als 'misschien', 'het lijkt erop dat', 'het is niet onwaarschijnlijk'. Dat was een groot verschil met het allesomvattende boek van de zeventiende-eeuwse natuurfilosoof. Om dezelfde reden verafschuwde Boyle de retoriek, hij schreef zo kaal mogelijk.

Centraal in Boyles geschriften stond de vacuümpomp. Daar richtte Hobbes zijn kritiek op. Het apparaat deed niet wat Boyle beweerde, luidde zijn kritiek. Het ding lekte aan alle kanten. De verschijnselen die Boyle verklaarde met het vacuüm dat volgens hem in de pomp ontstond, kon Hobbes uit het tegendeel afleiden. Een vacuüm betekende voor Hobbes "het absolute niets" en dat was zijns inziens filosofisch onmogelijk. Boyle had daarentegen een pragmatische opvatting over het vacuüm: het betekende niet meer dan dat een belangrijk deel van de lucht uit de ruimte in de pomp was verwijderd.

Hoe bescheiden Boyle zich naar eigen zeggen ook opstelde, Hobbes toonde met kracht van argumenten aan dat hij meer beweerde dan hij kon waarmaken. Zo vroeg Hobbes waarom het nodig was experimenten te herhalen. Als het experiment immers in staat was oorzaak en gevolg te scheiden, dan was één proef toch voldoende? Hobbes bleef op dit punt hameren.

Hij achtervolgde Boyle bijvoorbeeld met de vraag wat de oorzaak was van de 'veerkracht' van de lucht. Als de experimentator dat immers niet wist, dan wist hij toch niet wat er in zijn vacuümpomp gebeurde? Hoe kon hij dan zijn experimenten op de juiste wijze interpreteren? "Hoe kan geperste wol of een stalen plaat of atomen van lucht de oorzaak daarvan onthullen?" Boyle antwoordde hier karakteristiek op. Hij kende de oorzaak van de veerkracht van de lucht niet, maar dat was ook helemaal niet nodig: "Welke ware oorzaak ik U ook zou vertellen, U zou de waarheid daarvan niet accepteren en mij verder ondervragen over de oorzaak van die oorzaak en zo voort tot in het oneindige". De



Thomas Hobbes (1588-1679) (afbeelding: National Portrait Gallery, London)

experimentele feiten waren voor hem op zichzelf waardevol.

Een van Boyles centrale argumenten luidde dat iedere verstandige man zijn experimenten kon bijwonen. Ze werden immers in een publieke ruimte uitgevoerd. Ook dit argument werd door Hobbes krachtig bestreden. Hij toonde aan dat Boyles experimenten in feite in een besloten gezelschap van eerbiedwaardige heren werden uitgevoerd. Bovendien was er geen principieel verschil tussen het bijwonen van een experiment en het waarnemen van alledaagse gebeurtenissen. Waarom zouden experimenten dan een superieure manier van kennis verwerven zijn? "Worden ze niet voldoende getoond door de hemel, de zeeën en de aarde als geheel?", aldus Hobbes.

Revanche

Schaffer en Shapin verbinden deze zeventiende-eeuwse kritiek op de filosofische waarde van het experiment, met de moderne. Beide kritieken lijken sprekend op elkaar. Het heeft lang geduurd, maar Hobbes' kritiek lijkt in de twintigste eeuw een revanche te krijgen. In de wetenschapsfilosofie is de opvatting inmiddels gemeengoed dat elk experiment gebouwd is op theoretische veronderstellingen. Die liggen ten grondslag aan de theorie waarmee de proeven worden geïnterpreteerd. Ze zitten eveneens ingebouwd in de apparatuur, die immers volgens een theorie in elkaar is gezet. Experimenten kunnen daarom per definitie niet die onpartijdige scheidsrechters over onze natuuropvattingen zijn. Een eigenschap die Boyle aan hen toedichtte.

De Britse historici beweren echter meer dan dat Hobbes een voorloper was van de mo-

derne wetenschapskritiek. Ze plaatsen Boyles strategie bovendien in een eigentijds politiek kader. De scheiding tussen experimentele wetenschap en maatschappelijke politiek, waar hij zo op stond, was een politieke daad, aldus Schaffer en Shapin. Het debat tussen Boyle en Hobbes werd volgens hen sterk gekleurd door de politieke crisis in het zeventiende-eeuwse Engeland. Beiden zochten naar middelen om de religieuze en politieke perikelen in een rustiger vaarwater terecht te laten komen. Hun oplossingen waren diametraal tegenovergesteld.

Deze politieke motivatie verklaart het succes van Boyle nog niet. "Nee, daarvoor zouden we Boyle verder moeten volgen", bevestigt Schaffer, "in dit boek hebben we ons helemaal geconcentreerd op het debat met Hobbes". Naar zijn mening loopt er geen rechte lijn van Boyle naar de huidige wijze van experimenteren. "Het onpartijdige 'wij' in de moderne wetenschappelijke artikelen bestond bij Boyle bijvoorbeeld helemaal niet. Dat is pas in de negentiende eeuw opgekomen. Bij Boyle staat de experimentator als ik-figuur centraal".

Experimenten lijken op elkaar als leden van één familie. Er is gelijkenis, maar die is niet op een aantal duidelijke eigenschappen terug te voeren. Daarom is Schaffer niet gecharmeerd van de popularisatie van wetenschap waarin het zeventiende-eeuwse experiment centraal staat. "Er zijn immers veranderingen in de wetenschap opgetreden gedurende de achttiende, negentiende en twintigste eeuw. We bedriegen onszelf als we dat blijven ontkennen."

NATUUR & TECHNIEK verschijnt maandelijks, uitgegeven door de Centrale Uitgeverij en Adviesbureau BV te Maastricht.

Redactie en administratie zijn te bereiken op:

Voor Nederland:

Postbus 415, 6200 AK Maastricht.

Voor België:

Boechtstraat 15,

1860-Meise/Brussel.

Bezoekadres:

Stokstraat 24, 6211 GD Maastricht.

Telefoon: 0(0-31)43 254044 (op

werkdagen tot 16.30 uur).

Telefax: 0(0-31)43 216124.

Advertenties:

H. Beurskens

Voor nieuwe abonnementen:

0(0-31)43 254044 (tot 20.30 uur, óók in het weekend).

Abonnementsprijs (12 nummers per jaar, incl. porto): f 120,— of 2350 F. Voor drie jaar: f 285,— of 5585 F. Prijs voor studenten: f 90,— of 1765 F.

Overige landen: + f 35,— extra porto (zeepost) of + f 45,— tot f 120,— (luchtpost).

Losse nummers: f 11,75 of 230 F (excl. verzendkosten).

Distributie voor de boekhandel:

Betapress BV, Gilze. Tel.: 01615-7800.

Abonnementen op NATUUR & TECHNIEK kunnen ingaan per 1 januari of per 1 juli (eventueel met terugwerkende kracht), doch worden dan afgesloten tot het einde van het lopende abonnementsjaar.

Zonder schriftelijke opzegging vóór het einde van elk kalenderjaar, wordt een abonnement automatisch verlengd voor de volgende jaargang. TUSSENTIJDEN kunnen geen abonnementen worden geannuleerd.

De Centrale Uitgeverij is ook uitgever van DE WETENSCHAPPELIJKE BIBLIOTHEEK.

Door een lidmaatschap te nemen betaalt u voor elk boek een serieprijs die veel lager is dan de losse prijs. Voor inlichtingen: 0(0-31)43 254044.

Postrekeningen:

Voor Nederland: nr. 1062000 t.n.v. Natuur en Techniek te Maastricht.

Voor België: nr. 000-0157074-31 t.n.v. Natuur en Techniek te Brussel.

Bankrelaties:

Voor Nederland: AMRO-Bank NV te Heerlen, nr. 44.82.00.015.

Voor België: Kredietbank Brussel, nr. 423-907 0381-49.

PRIJSVRAAG

Oplossing juli

Toen de professor in het julinum-mer keek naar het muntje dat hij had laten vallen in een glas met een diameter van 9,5 cm, zag hij het precies in het midden van het wateroppervlak liggen. Een denkbeeldige lijn vanuit het oog van de professor midden door het beeld van de munt, doorsneed het tafelblad op 13 centimeter van het midden van het glas. Het beeld ontstond doordat het licht dat afkomstig is van de munt, weerkaatst tegen de achterwand van het glas en dan na breking door het wateroppervlak in het oog terecht komt. De reflectie is nodig om de omkering van het beeld ten opzichte van het voorwerp te verklaren. Omdat de munt in het midden van het glas ligt en de weerkaatsing aan een holle spiegel plaatsvindt (waarvan het brandpunt precies tussen het midden en de wand ligt) wordt het beeld ook weer in het midden van het glas gemaakt. Aangezien het weerkaatste licht schuin omhoog gaat, ligt het beeld op de as van het cilinderglas, maar er wel boven. Door het oog op de juiste plaats te houden lijkt het alsof het beeld precies in het midden van het oppervlak is. Dit is dan tevens het beeld dat met het wateroppervlak samenvalt. Uit de gegeven maten kan men de verhouding berekenen van de sinus van de invalshoek en die van de brekingshoek aan het wateroppervlak. Deze is:

$$n = \frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{13}{9,5} \approx 1,37.$$

Dankzij het mooie weer (of de toch wel wat lastige opgave) had de professor iets meer tijd voor het doornemen van de oplossingen dan de vorige maanden. Uiteindelijk is Frank Verherf uit Maasmechelen uit de bus gekomen als de winnaar van de lootprijs, een boek naar keuze uit de Wetenschappelijke Bibliotheek van Natuur & Techniek. Een gra-

tis jaarabonnement op Natuur & Techniek gaat naar A.H. Olde Bijvank uit Groningen, die deze maand de top van de laddercompetitie bereikte.

De nieuwe opgave

Als de professor 's avonds een lapje vlees op de barbecue wil braden, ruikt hij met zijn gevoelige neus opeens een chemische verbinding. Snel neemt hij een monster van de walmende briketten, dat hij de volgende dag kan onderzoeken. Deze verbinding blijkt in massaprocenten de volgende samenstelling te hebben: koolstof 66,6%, waterstof 11,2% en zuurstof 22,2%. Eén gram van deze verbinding heeft bij een druk van 101 kPa en een temperatuur van 112°C een volume van 444

cm³. Wat is de molekuulformule van deze verbinding? Tevens wil de professor graag van de puzzelaars een lijstje met twaalf structuuroisomeren (dus geen stereoisomeren) met deze molekuulformule ontvangen. Misschien zit het stofje dat hij rook er wel bij? Verbindingen met een hydroxyletheengroep zijn daarbij echter niet toegestaan, want die zijn niet stabiel.

De Stichting Scheikunde Olympiade Nederland stelde ons deze opgave ter beschikking. De oplossingen van deze prijsvraag moeten op 2 oktober zijn gearriveerd op het volgende adres: Natuur & Techniek
Puzzelredactie
Postbus 415
6200 AK MAASTRICHT



VOLGENDE MAAND IN NATUUR EN TECHNIEK

Sterrenas

Dr M. Huyse en dr P. Van Duppen

Alle scheikundige elementen en hun verschillende isotopen zijn ontstaan in de grote smeltkroes van de Oerknal en in de meer bescheiden sterrenovens. We zijn 'niets meer dan sterrenas'. Belgische onderzoekers zijn er nu in geslaagd om fusie-reacties die zich in sterren voordoen, hier op aarde te bestuderen.



Ontwikkelen

Dr Jacqueline Belloni-Coffler e.a.

Eén van de belangrijkste uitvindingen voor de moderne fotografie was het ontwikkelprocédé, dat korte belichtingstijden — en daardoor onbewogen foto's — mogelijk maakte. Alhoewel het ontwikkelprocédé van doorslaggevend belang is voor dit succes, begrijpen we de fysisch-chemische basis van fotografie pas sinds kort.



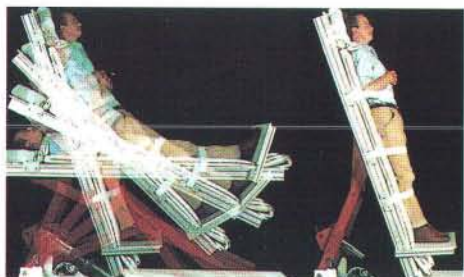
Planeten

Prof dr H.N.A. Priem en prof dr N.J. Vlaar

Vóór het ruimtevaart-tijdperk waren de planeten en hun satellieten het domein van de astronomie. Tegenwoordig vormen zij echter objecten voor geologisch en geofysisch onderzoek. Onze burens de Maan, Mars en Venus zijn inmiddels



door sondes onderzocht, terwijl gesteenten van de Maan naar laboratoria op Aarde zijn gebracht.



Angst

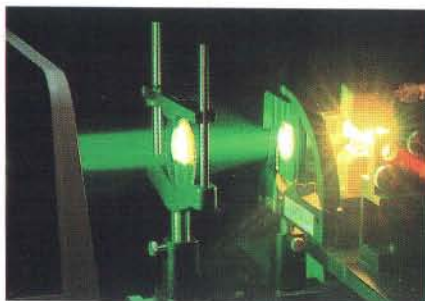
Dr H.L.G.J. Merckelbach

Fobische patiënten koesteren een intense en hardnekkige angst voor bepaalde dieren, objecten of situaties. Fobieën komen veel voor en tasten de bewegingsvrijheid van het individu aan. Hoe fobieën ontstaan en langs welke weg ze te behandelen zijn valt nog steeds te begrijpen aan de hand van Pavlovs leertheorie.



KIJK OP WETENSCHAP

Lasers



Bijna dertig jaar na zijn geboorte lijkt de laser nog steeds iets heel speciaals. Zijn meest opzienbarende toepassingen blijven beperkt tot de besloten ruimte van het laboratorium of tot de wereld van de science fiction. Toch vormen lasers tegenwoordig een belangrijk deel van ons leven.

Bloeddruk

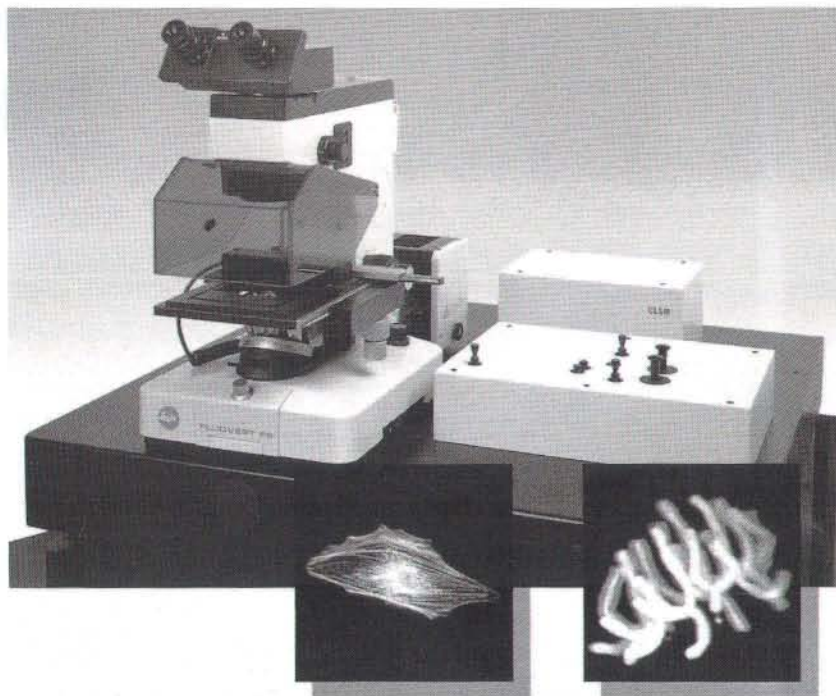
Dr J.M. Karemaker

"Als ik plotseling opsta, voel ik me soms wat licht in mijn hoofd; komt dat niet doordat het bloed naar mijn benen zakt?" Het effect van de zwaartekracht op de bloedsomloop merken

we ook als we op ons hoofd gaan staan: dat wordt warm en komisch rood — alweer verplaatst het bloed zich, nu naar een plek waar het anders niet zo makkelijk komt.

Confocale Laser Scanning Mikroskoop (CLSM)

De Sleutel tot 3-Dimensionale Mikroskopie



De **Leica CLSM**-systemen overbruggen de ruimte tussen de konventionele lichtmikroskopie en de elektronen-mikroskopie. Een doordacht ontwerp en een gering aantal zorgvuldig gekozen optische componenten staan garant voor hoge kwaliteit 3-dimensionale reflectie- en fluorescentie beelden van mikroskopische preparaten.

De **Leica CLSM** wordt gekenmerkt door een hoge resolutie en een hoge lichtopbrengst (in fluorescentie), waardoor de kleinste details ruimtelijk kunnen worden geobserveerd en vastgelegd.

Toepassingen in o.a.:

- medisch/biologisch onderzoek
- tandheelkunde
- onderzoek aan: films/folies, verf, keramiek, farmaceutische en chemische producten
- kunststof- en glasvezel-industrie

LEICA B.V.

Afdeling Quantitatieve Mikroskopie
Postbus 80, 2280 AB Rijswijk
Verrijn Stuaartlaan 7, 2288 EK Rijswijk
Tel: 070 - 3 198 999 Fax: 070 - 3 905 659

Leica